



Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique

Marie-France Rouffiac-Missonier

► To cite this version:

Marie-France Rouffiac-Missonier. Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Denis Diderot Paris 7, 2002. Français. NNT: . tel-01275806

HAL Id: tel-01275806

<https://theses.hal.science/tel-01275806>

Submitted on 18 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PARIS 7
Denis DIDEROT

THESE

Spécialité : Didactique des disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques

Présentée pour obtenir le grade de docteur par

Marie – France
ROUFFIAC - MISSONNIER

**Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves
lors d'une ingénierie didactique
d'électrocinétique**

Soutenue le 18 Septembre 2002 devant la commission d'examen composée de

M. Samuel JOHSUA	Président du jury
M. Jean-Michel DUSSEAU M. Christoph von RHOENECK	Rapporteurs
M ^{me} Monique SAINT-GEORGES M ^{me} Edith SALTIEL	Examineurs
M. Jean-Louis CLOSSET	Directeur de thèse

Laboratoire de didactique des Sciences Physiques

Remerciements

Je voudrais commencer par remercier ceux qui m'ont permis de mener de front recherche et enseignement, à savoir ma famille et mes chefs d'établissement.

Je tiens ensuite à remercier plus spécialement Monsieur le professeur Jean-Louis CLOSSET, qui a bien voulu accompagner ce travail. Ses conseils éclairés, ses encouragements et ses exigences constituèrent un soutien constant fort précieux. Je lui en suis particulièrement reconnaissante. Ils ont contribué à donner une autre dimension à la recherche envisagée.

Ce travail a bénéficié du soutien chaleureux de membres du L.D.S.P. et du L.I.R.E.S.T. : Andrée Dumas-Carré, Martine Méheut, Edith Saltiel, Laurence Viennot et Annick Weil-Barais par leurs encouragements, leurs questions et leurs conseils pour l'avancement du travail. Françoise Chauvet et Colette Hirn ont trouvé les expérimentateurs d'autres académies. Que toutes trouvent ici l'expression de mes plus vifs remerciements.

Je souhaite aussi adresser ma reconnaissance et mes remerciements à tous mes collègues qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la prise de données : ceux qui ont fait passer des questionnaires dans leurs classes comme ceux qui ont accepté l'aventure, avec leurs élèves, d'un autre contrat didactique.

Un remerciement tout particulier à Monique Saint-Georges qui m'a procuré un stagiaire acceptant d'expérimenter la séquence, et m'a fourni l'occasion de présenter ce travail à des stagiaires de l'IUFM de Limoges.

Je ne peux oublier, à l'heure des remerciements, les élèves avec lesquels, à l'occasion d'un nouveau contrat didactique, est née une chaleureuse complicité.

J'adresse mes remerciements respectueux à ceux qui ont accepté de lire et de juger ce travail :

à M. le professeur S.JOHSUA qui m'a fait l'honneur de présider cette thèse ;

à Messieurs J.M.DUSSEAU et Ch. von RHOENECK qui ont accepté la charge de rapporteur ;

à Mesdames M. SAINT-GEORGES et E. SALTIEL qui ont bien voulu participer à l'évaluation de ce travail.

TABLE des MATIERES

INTRODUCTION

I / Les origines de la recherche	12
II / Plan d'étude	13

Première partie : ANALYSES

Chapitre I Analyses préalables

A - Analyse de l'enseignement habituel et de ses effets

I – Analyse de l'enseignement habituel	15
1 – L'électricité au collège	15
1 - a – Le programme pour la classe de 4 ^e	15
1 - b – Le programme pour la classe de troisième	16
1 - c – Les capacités à évaluer en sciences physiques	16
1 - d – Les caractéristiques de ces programmes	17
1 - e – Analyse de manuels scolaires	18
2 – L'électricité au lycée	19
2 - a – Le programme pour la classe de seconde	19
2 - b – Analyse de manuels	20
II – Ce qu'on serait en droit d'attendre de l'élève qui arrive en seconde	21
1 – A la lecture des programmes	21
1 - a – Savoirs-faire expérimentaux attendus	21
1 - b – Modélisation de l'électrocinétique	21
2 – A la lecture des manuels	21
3 – A la lumière des analyses	21
III – La méthode d'apprentissage utilisée dans l'enseignement habituel	22
1 – Essai de description par les enseignants eux-mêmes	22
1 - a – Document fourni	22
1 - b – Réactions recueillies	23
1 - c – Analyse des réponses	24
2 – Description de l'enseignement habituel à partir de travaux de recherche	24
2 - a – Le savoir : nature et mode de transmission	24
2 - b – Le professeur	26
2 - c – L'élève	27
IV – Les effets de cet enseignement	29
1 – Au niveau des connaissances de l'élève	29
1 - a – Une science réduite à des formules	29
1 - b – Une science réduite à des recettes	29
1 - c – Une science dépourvue de modélisation	29

2 – Les effets au niveau de la représentation de la physique	30
V – Les objectifs généraux des programmes de chimie	30
B - Représentations des élèves en électrocinétique à l'entrée en seconde	
I – Nos connaissances sur les représentations	32
1 – Définition	32
2 – Intérêt des représentations	32
2 - a – Rôle des représentations	32
2 - b – Efficacité des représentations	33
3 – Evolution	34
II – Les représentations en électrocinétique	34
1 – La notion de courant	34
1 - a – Existence de la notion de courant chez l'élève qui entre en seconde	34
1 - b – Quelles sont les propriétés attribuées au courant par l'élève ?	35
2 – Diverses représentations de la notion du « fluide-courant »	37
2 - a – Le modèle unipolaire ou représentation unifilaire	37
2 - b – Le modèle des courants antagonistes	37
2 - c – Les raisonnements à épuisement de courant et séquentiel	38
2 - d – Le raisonnement local	43
2 - e – Le raisonnement à courant constant	44
3 – Caractères généraux de ces représentations	46
3 - a – L'absence des concepts de circuit et de circulation	46
3 - b – Caractéristiques des modèles circulatoires	47
3 - c – Ténacité des représentations	48
C - Analyse épistémologique des contenus à enseigner	
I – Nature de la connaissance scientifique	50
1 – Différentes façons de penser la physique	50
1 - a – Evolution historique du dogme à l'hypothèse	50
1 - b – Que font vraiment les physiciens ?	51
1 - c – Quel intérêt de le savoir pour l'apprentissage ?	52
2 – Le modèle	54
2 - a – Définitions	54
2 - b – De la réalité aux concepts	55
2 - c – Fonctions du modèle	56
2 - d – Intérêt de cette analyse en vue de l'apprentissage	56
3 – La transposition didactique	58
3 - a – Quelques éléments d'un modèle de référence acceptable par le physicien	58
3 - b – La nécessité d'une transposition	59
3 - c – Les contraintes d'élaboration du savoir enseigné	59
II – Le modèle de fonctionnement du circuit que nous souhaitons voir construire	62
1 – Les objectifs spécifiques de la séquence : le modèle élémentaire retenu	62
1 - a – Premiers éléments du modèle retenu	62
1 - b – Remarques	63
1 - c – Compléments appartenant au modèle retenu	63
2 – Les aides à la construction du modèle par l'élève	64
2 - a – Comment rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances ?	64
2 - b – Quelle place pour l'expérience ?	66
2 - c – Germes de modèle et modèles précurseurs	68

2 - d - Les analogies	69
3 - Le rôle du maître	73
3 - a - La dévolution du problème dans un cadre constructiviste	74
3 - b - Le maître médiateur	74
3 - c - Le maître tuteur	76
3 - d - Le statut de l'erreur	77
4 - Analyse de propositions de didacticiens de l'électricité	78
4 - a - Intérêt d'un enseignement qualitatif	78
4 - b - Définition d'une démarche expérimentale	82
4 - c - Une introduction indépendante des concepts ?	86
4 - d - Faut-il aborder l'aspect énergétique ?	88
4 - e - Le schéma électrique	89
4 - f - Le circuit électrique, système en interaction	91

D - Champ de contraintes

I - Contraintes épistémologiques 94

II - Contraintes cognitives et affectives 94

1 - Caractéristiques cognitives	95
2 - Ressources cognitives	95
2 - a - Le registre « des représentations symboliques »	95
2 - b - Le registre « des expériences pratiques »	95
3 - Le vécu de l'élève en classe de physique	96

III - Contraintes didactiques 96

1 - Le programme et les directives officielles	96
1 - a - Les objectifs du programme	96
1 - b - La planification des séances de travaux pratiques	96
1 - c - L'horaire global consacré à l'électrocinétique	97
1 - d - L'horaire hebdomadaire	97
1 - e - Les effectifs	97
2 - Le contrat didactique	97
3 - Contraintes liées à l'expérimentation de la séquence	98

Chapitre II Analyse a priori

A - Connaissances sur les processus d'apprentissage en physique

I - Le constructivisme 99

1 - L'hypothèse constructiviste	99
2 - Conséquences	99
3 - L'activité intellectuelle de l'apprenant	100
3 - a - La sélection de l'information	100
3 - b - L'assimilation des informations	101
3 - c - L'accommodation des structures cognitives	101

II - La dévolution 102

III - La pédagogie de la maîtrise 103

IV – Les interactions participant à l'apprentissage	103
1 – Interactions avec le phénoménal	103
2 – Interactions avec le maître	104
a – Le choix de la situation à l'origine de l'apprentissage	104
b – Le choix des étapes par lesquelles passera l'apprentissage	104
c – Le choix des aides à l'apprentissage	104
3 – Interactions entre pairs	105
 B - Nos choix concernant l'apprentissage, sur lesquels se fonde la séquence	
I – Objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence	106
1 – Quels sont nos objectifs ?	106
1 - a – Partir de l'état réel des connaissances de l'élève qui arrive en seconde	106
1 - b – Initier l'élève à une démarche scientifique	107
1 - c – Rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances	107
2 – En quoi nos objectifs diffèrent-ils de ceux de l'enseignement usuel ?	107
2 - a – Par la prise en compte de l'état initial tel qu'il est	107
2 - b – Par l'éveil de la curiosité	107
2 - c – Par l'initiation à une démarche scientifique	108
 II – Observations lors d'essais préliminaires	109
1 – Questionnaire passé en fin de troisième	109
2 – Analyse des réponses recueillies	109
2 - a – Les concepts	109
2 - b – La représentation du fonctionnement du circuit	110
3 – Les connaissances de l'élève qui entre en seconde	110
3 - a – Les connaissances attendues à partir de nos analyses préalables	110
3 - b – Conséquences sur nos choix concernant l'apprentissage	112
 III – Nos choix	112
1 – La maîtrise des prérequis	113
2 – Une approche énergétique du circuit	113
3 – Une approche qualitative des concepts	114
4 – Introduction indépendante et progressive des concepts	115
 IV – Conséquences de nos choix sur le déroulement de la séquence	115
1 – Conséquences des choix sur le plan de la séquence	115
1 - a – La maîtrise des prérequis	115
1 - b – Une première approche énergétique du circuit	116
1 - c – Une première approche qualitative	116
1 - d – Une approche indépendante des concepts	116
2 – Conséquence des choix sur la démarche d'apprentissage	118
2 - a – Maîtriser les prérequis	118
2 - b – Une approche énergétique	118
2 - c – Une approche qualitative	119
2 - d – Une approche progressive et indépendante des concepts	120
 V – Analyse a priori des effets attendus de ces choix	121
1 – Recherche d'effets plus spécifiques :	121
1 - a – La maîtrise des prérequis	121
1 - b – L'approche énergétique	121

1 - c - L'approche qualitative	122
1 - d - l'introduction indépendante et progressive des concepts	122
2 - Effet global de cet ensemble d'hypothèses sur l'apprentissage	123

C - Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

I - Observations d'un chemin cognitif	124
1 - Quelques observations	124
2 - Quelques justifications a posteriori	124
2 - a - Justification à partir du nombre d'éléments de circuit pris en compte	124
2 - b - Justification à partir des discontinuités du débit	125
II - Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage	125
III - Observations à mettre en oeuvre autour de cette hypothèse	125

Deuxième partie : EXPERIMENTATION

A - Méthodologie

I - Les acteurs de l'expérimentation	2
1 - Les enseignants	2
a - Le chercheur	2
b - Les enseignants de Brive ayant participé à l'expérimentation	3
c - Les enseignants d'autres académies	4
d - Liens entre les expérimentateurs et le chercheur	4
2 - Les élèves	5
II - Recueil et analyse de données	5
1 - Données recueillies	5
a - Les réponses aux questionnaires	5
b - Les entretiens	7
c - Les réactions des partenaires de la séquence	8
2 - Analyses prévues en lien avec les hypothèses	9
a - La recherche de chemins d'apprentissage	9
b - La recherche d'effets attendus en lien avec les hypothèses	9
c - Intérêt de la prise de repères extérieurs	11
d - Observation de l'influence d'autres paramètres	11

B - La séquence

I - Démarche de construction d'un concept	12
1 - Première étape : un questionnaire	12
2 - Deuxième étape : communication de la prévision de l'élève à ses voisins	13
3 - Troisième étape : partage des prévisions avec l'ensemble de la classe	13
4 - Quatrième étape : expérimentale	13
5 - Cinquième étape : les apports du maître	13
6 - Sixième étape : les réinvestissements	14

7 – Septième étape : le schéma électrique	15
8 – Etape finale : l'évaluation	15
II – L'activité de l'élève qui apprend avec la séquence	16
1 – L'élève et les questionnaires	16
a – Activité de réponse aux questions	16
b – Mise en commun des réponses	16
2 – L'élève et l'expérience	16
a – Observations	16
b – Test d'hypothèses	17
3 – L'élève et la connaissance nouvelle	17
a – Passage du niveau des événements au niveau des concepts	17
b – Prise en compte de la connaissance nouvelle	17
c – Appropriation de la connaissance nouvelle	17
III – Plan de la séquence et durée de l'expérimentation	18
1 – Plan de la séquence	18
2 – Durée de l'expérimentation de la séquence	19

Troisième partie : RESULTATS

A - En termes de suivis

I – Documents disponibles	2
1 – Les documents	2
a – Le questionnaire après enseignement de la circulation	2
b – Le questionnaire préliminaire à l'intensité	2
c – Le réinvestissement	2
d – Le test intensité et d.d.p.	2
e – Le test final en Mai 2000	3
2 – L'exploitation de ces documents	3
a – Nous ne nous intéressons qu'au circuit qui fonctionne	4
b – Influence de la résistance sur le débit	4
c – Utilisation de raisonnements différents selon la question	4
d – Dossiers incomplets	4
II – Evolution du raisonnement de l'élève du circuit simple à la branche principale	4
1 – Elèves partant d'un raisonnement local	4
a – Données recueillies	4
b – Analyse	5
2 – Elèves partant d'un raisonnement séquentiel	6
a – Observations	6
b – Analyse	6
3 – Elèves partant d'un raisonnement à courant constant	7
4 – Elèves partant d'un raisonnement correct	7
a – Observations	7
b – Analyse	7
III – Evolution du raisonnement de l'élève sur la branche dérivée dont la résistance varie	8
1 – Observations	8
2 – Analyse	9

a – Evolution de chacun des raisonnements initiaux sur la branche	9
b – Comparaison avec l'évolution sur la branche principale	9
IV – Récapitulatif des observations	10
1 – Comparaison du raisonnement adopté par l'élève sur le circuit simple, puis sur la branche dérivée	10
a – Observations	10
b – Analyse	10
2 – Comparaison du raisonnement adopté par l'élève sur le circuit principal et sur la branche	10
3 – Comparaison avec des tentatives antérieures d'observation	11
a – Suivi de l'évolution des raisonnements cohérents	11
b – Observation de l'évolution du raisonnement utilisé sur le circuit série et celui sur les différentes branches d'un circuit mixte	13
V – Conclusions	16
1 – Evolutions du raisonnement observé initialement sur le circuit simple	16
a – Comparaison avec le raisonnement employé sur le circuit principal	16
b – Comparaison avec le raisonnement employé sur la branche dérivée	16
c – Comparaison entre les raisonnements employés sur la branche principale et la branche dérivée d'un circuit mixte	17
2 – Conclusions et perspectives de recherche	17
 B - Autres observations liées à l'expérimentation de la séquence	
I - Vérification d'une base de départ voisine	18
1 – Etat des lieux à l'entrée en seconde, à Brive	18
a – Réponses recueillies au questionnaire	18
b – Analyse des réponses recueillies	22
2 – Etat des lieux à l'entrée en seconde, dans d'autres académies	22
a – Questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'électricité	22
b – Questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité	24
3 – Conclusion : ce que sait l'élève qui entre en seconde	27
II - Différences au niveau des acquis entre les différentes populations d'élèves ayant appris avec la séquence	28
1 – Quelques observations au cours du questionnaire final en Mai 1999, à Brive	28
Concept de circulation :	29
a – Unicité du débit sur le circuit simple	29
b – Unicité du débit sur le circuit série	31
c – Dipôles montés en dérivation	32
d – Réinvestissement sur le circuit mixte	34
e – Analyse des observations concernant le concept d'intensité	35
Concept de différence de potentiel	38
a – Connaissances qualitatives de la d.d.p. sur le circuit simple	38
b – Les prévisions numériques sur le circuit simple	39
c – Propriétés du concept de d.d.p. le long d'un circuit série	40
d – Propriétés de la d.d.p. aux bornes d'éléments montés en dérivation	41
e – Réinvestissements des propriétés de la d.d.p. sur le circuit mixte	41
f – Analyse des observations concernant le concept de d.d.p.	42
2 – Quelques observations lors du questionnaire final passé dans différentes académies	47
2 – a – Questions en termes de d.d.p.	47
2 – b – Questions en termes d'intensité	50
2 – c – Prévisions numériques	52
2 – d – Réponses correctes recueillies concernant le concept de d.d.p.	53

2 - d - 1 - Tableau des réponses qualitatives correctes	53
2 - d - 2 - Tableau des réponses numériques correctes	54
2 - e - Réponses recueillies concernant le concept d'intensité	55
2 - e - 1 - Tableaux des réponses qualitatives	55
2 - e - 2 - Réponses numériques recueillies	57
2 - f - Hypothèses sur l'origine de la diversité des acquis	60
2 - f - 1 - Conditions de mise en oeuvre de la séquence	60
2 - f - 2 - Clés d'accès à la réponse correcte	60
2 - g - Conclusion	61
III - Les acquis sont-ils éphémères	62
1 - Concept de circulation	
1 - a - Réponses qualitatives portant sur le circuit simple	63
1 - a - 1 - Réponses qualitatives sur le circuit simple	63
1 - a - 2 - Analyse des réponses en lien avec les objectifs	64
1 - b - Réponses qualitatives sur le circuit simple dont la résistance change	64
1 - b - 1 - Tableau des réponses aux questions qualitatives	64
1 - b - 2 - Analyse des réponses en lien avec les objectifs	65
1 - c - Réponses aux questions qualitatives portant sur le circuit série	65
1 - c - 1 - Tableau des principales réponses	65
1 - c - 2 - Analyse des réponses en lien avec les objectifs	66
1 - d - Réponses qualitatives portant sur le circuit avec dérivation	67
1 - d - 1 - Tableau des réponses qualitatives	67
1 - d - 2 - Analyse des réponses en lien avec les objectifs	67
1 - e - Réponses numériques	69
1 - e - 1 - Question V_1	69
1 - e - 2 - Question V_2 avec dipôles en série	69
1 - e - 3 - Question V_2 avec dipôles en dérivation	70
1 - e - 4 - Questions V_3 montages mixtes	73
1 - e - 5 - Analyse par rapport aux objectifs de la séquence	74
2 - Concept de d.d.p.	
2 - a - Réponses qualitatives portant sur le circuit simple	75
2 - a - 1 - Observations en lien avec les objectifs de la séquence	75
2 - a - 2 - Conclusions	77
2 - b - Réponses qualitatives sur le circuit dont la résistance change	77
2 - b - 1 - Tableau des réponses recueillies	77
2 - b - 2 - Observations en lien avec les hypothèses de la séquence	78
2 - c - Réponses aux questions qualitatives portant sur le circuit série	79
2 - c - 1 - Tableau récapitulatif des réponses	79
2 - c - 2 - Analyse en lien avec les objectifs de la séquence	80
2 - d - Réponses qualitatives portant sur le circuit avec dérivation	81
2 - d - 1 - Tableau des réponses	81
2 - d - 2 - Analyse en lien avec les objectifs de la séquence	81
2 - e - Réponses numériques	82
2 - e - 1 - Question V_1	81
2 - e - 2 - Question V_2 avec dipôles montés en série	83
2 - e - 3 - Question V_2 avec dipôles montés en dérivation	83
2 - e - 4 - Questions V_3 avec des circuits mixtes	84
2 - e - 5 - Analyse en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence	87
Conclusion : essai de synthèse des réponses à ce questionnaire en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence	89
IV - La séquence vécue par les élèves	95
1 - Les questionnaires	95
2 - Les travaux pratiques, tests d'hypothèses	96
3 - Les entretiens	96
3 - a - Les entretiens avec les élèves de la séquence	96

3 – b – Les entretiens avec des élèves ayant suivi un autre enseignement	96
4 – Conclusion	97

Quatrième partie : ANALYSE A POSTERIORI

A – Retour sur les hypothèses

A1 – Recherche des effets spécifiques de certaines hypothèses

I – Recherche d’effets en lien avec la maîtrise des prérequis	2
1 – Exemple de la mise en oeuvre de la maîtrise des prérequis	2
2 – Attentes de la maîtrise des prérequis par les élèves	2
3 – Observations en lien avec la mise en oeuvre de la maîtrise des prérequis	3
3 – a – Evolution des connaissances concernant le concept d’intensité	3
3 – b – Dispersion des représentations	4
3 – c – Entraînement des élèves dans la tâche d’apprentissage	5
II – Recherche d’effets en lien avec l’approche énergétique	5
1 – Attentes d’une approche énergétique du circuit électrique	5
1 – a – Une diminution du taux d’interprétations dites « énergétiques »	6
1 – b – Une diminution des raisonnements avec discontinuité du débit	6
1 – c – Un début de représentation de la différence de potentiel	6
2 – Observations en lien avec l’approche énergétique	6
2 – a – Evolution des justifications énergétiques	7
2 – b – Evolution des représentations locales et séquentielles	8
III – Recherche d’effets en lien avec l’approche qualitative	11
1 – Attentes d’une approche qualitative du fonctionnement du circuit et des concepts permettant de le décrire	11
2 – Observations en lien avec l’approche qualitative	11
2 – a – Vocabulaire utilisé pour justifier	11
2 – b – Représentation d’un nœud	14
2 – c – Représentation du générateur et du circuit	16

A2 – Recherche des effets de la mise en oeuvre du bouquet d’hypothèses

Rappels :	
1 – Rappels des objectifs de connaissance poursuivis par la séquence	18
2 – Rappel de l’état initial, avant enseignement	18
I – Recherche d’un progrès cognitif	19
1 – Recherche d’un progrès par appropriation du vocabulaire	19
1 – a – Concept de circulation	19
1 – b – Concept de d.d.p.	19
1 – c – Concept de résistance	20
1 – d – Résumé des observations	21
2 – Recherche d’un progrès au niveau d’explications qui prennent sens	21
2 – a – Justifications indiquant une représentation de l’intensité	21

2 – b – Justifications illustrant une représentation du rôle de la résistance	21
2 – c – Justifications illustrant une représentation du concept de d.d.p.	22
3 – Recherche d'un progrès par des prévisions différentes	23
3 – a – Concept de circulation	23
3 – b – Concept d'intensité	24
3 – b – 1 – Rappel de l'état initial	25
3 – b – 2 – Evolution de ces raisonnements	25
3 – b – 3 – Loi des nœuds	26
3 – b – 4 – La représentation du générateur	27
3 – b – 5 – La représentation du fil	29
3 – c – Concept de d.d.p.	30
3 – c – 1 – Observation de la d.d.p. aux bornes du générateur	30
3 – c – 2 – Observation de la d.d.p. aux bornes du fil	33
3 – c – 3 – Propriétés de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série ou en dérivation	35
II – Réactions des partenaires de l'apprentissage	40
1 – Evaluation par les élèves	40
2 – Evaluation par les expérimentateurs	41
 A3 – Dans quelle mesure les hypothèses ont-elles été mises en oeuvre ?	
I – Maîtrise des prérequis	42
1 – Circuit et circulation	42
2 – La différence de potentiel	43
3 – Les unités	43
4 – Les élèves dépourvus de réponse	44
II – Approche qualitative	44
III – Comment affiner l'intervention en vue d'une meilleure gestion des hypothèses	45
1 – Transmission de la séquence	45
1 – a – Sensibilisation aux représentations	45
1 – b – Réflexion sur les pôles du triangle didactique	46
2 – Nécessité de moyens horaires	47
3 – Intérêt de sections différenciées	48
 B - Prises de repères externes	
I – Remarques préliminaires	49
1 – Objectifs d'apprentissage	49
2 – Comparaison des représentations à l'entrée en seconde	49
3 – Populations participant à la prise de repères	50
II – Observation de l'engagement de l'élève dans l'apprentissage	50
III – Utilité d'enseigner ce qu'on a l'habitude de considérer comme évident	51
IV – Evolution du niveau cognitif des concepts liés au sein de la loi d'Ohm	52
1 – Concept d'intensité	52
2 – Concept de d.d.p.	54
2 – a – D.d.p. aux bornes du générateur	54

2 - d - D.d.p. aux bornes d'éléments d'un circuit à deux récepteurs	57
2 - e - Réinvestissement des lois de la d.d.p. dans le montage mixte	57
3 - Concept de conducteur-résistant	59
3 - a - Conservation du débit le long d'un montage en série	59
3 - b - Effet d'une résistance sur le débit	60
4 - Concept de circuit : interaction entre le circuit et le générateur	61
5 - Nature de la connaissance à laquelle chacun de ces enseignements donne accès	63
V - Conclusion de la prise de repères externes	63

Cinquième partie : CONCLUSIONS

I - Des éléments de conclusion	1
1 - Etapes d'apprentissage	1
1 - a - Circulation et intensité	1
1 - b - Différence de potentiel	2
1 - c - Conducteur-résistant	2
2 - Quelques aides pour l'accès aux concepts	3
3 - Un savoir d'une nature différente	3
4 - Le vécu des partenaires de l'apprentissage	4
4 - a - L'élève	4
4 - b - Le maître	4
II - Perspectives	5
1 - Si c'était à refaire	5
1 - a - Nécessité de différencier les populations	5
1 - b - Nécessité d'alléger les programmes	5
1 - c - Nécessité d'espaces de liberté	6
1 - d - Nécessité d'une réelle formation des maîtres	6
2 - Pour aller plus loin	7

Bibliographie

Résumé

ANNEXES

ANNEXE I	Programmes d'électricité
ANNEXE II	Questionnaires avant enseignement
ANNEXE III	Questionnaire emprunté à J.L.Closset
ANNEXE IV	Dossier envoyé aux enseignants volontaires pour enseigner la séquence
ANNEXE V	Texte de la séquence d'enseignement de l'électricité
ANNEXE VI	Evaluations - Questionnaires après enseignement
ANNEXE VII	Mémoire professionnel de Lionel Jourdes
ANNEXE VIII	Evaluation de la séquence par les élèves
ANNEXE IX	Document utilisé lors de la 1 ^o séance de l'option sciences expérimentales - 1 ^o S

INTRODUCTION

Introduction

I / Les origines de la recherche

Enseignante enthousiaste ayant la volonté de faire partager à mes élèves le plaisir qui naît et grandit avec la compréhension du monde qui nous entoure, je me trouve de plus en plus en présence d'élèves qui cherchent plus à réussir qu'à comprendre. Travailler et apprendre prennent un sens différent pour mes élèves et moi-même :

- pour le jeune il s'agit d'obtenir un diplôme... et il est très peu question de savoir ;
- pour l'enseignant, c'est aider les élèves à s'approprier du savoir, dans le meilleur des cas, par une démarche active et volontaire.

C'est ce qui explique, au moins en partie, que j'ai pu constater au quotidien :

- l'inefficacité des démarches usuelles : quelle que soit l'énergie dépensée par l'enseignant, le rendement du savoir acquis par rapport au temps investi est très faible ;
- un certain nombre d'erreurs de raisonnement, ou d'idées erronées qui reviennent avec une reproductibilité déconcertante chez certains élèves ;
- que les enseignants comme les élèves qui y trouvent du plaisir se font rares. J. Piaget prétendait d'ailleurs que ce n'est pas la science mais les cours de science qui n'intéressent pas les élèves.

Ces constats m'ont mis en recherche de raisons à l'inefficacité des démarches usuelles, et c'est ainsi que je suis venue à la didactique. Une vingtaine d'années de recherches visant à comprendre les idées, les façons de raisonner, le cadre de référence des élèves, en un mot leurs représentations conduisent à envisager de nouvelles formes d'enseignement. J'ai découvert des idées mais aussi l'existence d'une liberté pédagogique insoupçonnée qui m'ont donné envie de tester des hypothèses, en situation de classe, dans le cadre de l'ingénierie didactique. Il s'agira d'évaluer les effets d'interventions contrôlées dont nous spécifierons de manière détaillée les règles de construction, les modalités et la manière dont nous tirerons les conclusions. Il s'agira d'analyser les réponses d'une partie du système « élèves – maître – savoir » à une intervention visant un but donné, *« non en vue d'une modification immédiate du système d'enseignement, mais en vue d'éprouver les hypothèses émises et ainsi d'accroître les connaissances théoriques en didactique de la physique »* (S. Johsua, 1983)

Enseignante en classes de seconde et de première, j'étais plus particulièrement confrontée à l'incompréhension des élèves en électricité, point de départ de cette recherche. Celle-ci a commencé par une prise en compte des recherches antérieures portant sur :

- les interactions participant à l'apprentissage, en particulier les rôles et places que l'on peut attribuer :
 - o à l'élève, en interaction avec le savoir, le maître et les autres élèves ;
 - o à l'expérience comme interface entre les phénomènes et leur interprétation ;
 - o à l'enseignant, en interaction avec le savoir, l'élève et le groupe « classe » ;
- les représentations, plus particulièrement en électricité, complétées d'observations personnelles, qui ont permis d'en constater :
 - o la diversité,
 - o la ténacité plus ou moins grande : leur évolution comme leur réapparition ;
 - o les conséquences au niveau des tâches habituelles demandées aux élèves ;
- la nature spécifique de la connaissance scientifique et les difficultés propres à la physique qui *« entretient des liens avec le formalisme mathématique et la logique tout en étant directement liée aux observations du réel »* (S. Johsua, 1983)

Ces analyses préalables nous ont conduit à faire des choix pilotant une autre démarche, un autre contrat didactique et à la construction d'une séquence d'enseignement des bases de l'électrocinétique ayant pour fil conducteur des hypothèses choisies dans le but d'aider l'élève à se construire une représentation du circuit électrique compatible avec celle du physicien. Nous souhaitons que l'élève puisse donner du sens aux grandeurs circuit, circulation, intensité, différence de potentiel et résistance électrique, c'est à dire l'aider à construire des modèles qualitatifs en amont de modèles quantitatifs. Nous chercherons aussi à réduire au maximum la part d'implicite dans l'enseignement.

L'analyse a priori débouche sur des hypothèses dont nous déterminerons les effets attendus. Elles seront testées lors de l'expérimentation de la séquence, dans des conditions habituelles d'enseignement, et nous en ferons une analyse a posteriori, conduisant à une validation et impliquant un retour sur les hypothèses. Nous prendrons aussi des points de référence externes.

De ces observations, nous essaierons de tirer quelques modestes conclusions limitées aux conditions de notre expérimentation.

II - Plan d'étude

Notre travail se situe dans le cadre de l'**ingénierie didactique**, et sera donc mis en oeuvre **en situation de classe**.

En préambule à cette recherche, nous avons effectué auprès de nos élèves une étude aussi précise que possible de leurs représentations. Cette analyse des représentations nous a permis de mieux comprendre pourquoi les élèves éprouvaient les plus grandes difficultés de compréhension de l'électricité. C'est pourquoi nous souhaitons nous centrer sur **les processus d'apprentissage**. Ils apprennent en classe, c'est donc en situation de classe que nous voulons agir. Nous avons choisi d'utiliser la méthodologie de l'ingénierie didactique appliquée à une séquence d'électricité en classe de seconde.

Dans un premier temps nous réaliserons des **études préalables**, à savoir l'analyse :

- de l'enseignement habituel et de ses effets ;
- des représentations : leurs rôles, leur ténacité et leurs possibilités d'évolution ;
- épistémologique des contenus à enseigner : fonction et rôle du modèle, nécessité de transpositions pour en faciliter l'accès à l'élève ;
- du champ des contraintes dans lequel va se situer la réalisation didactique ;
- des objectifs spécifiques de la recherche.

Nous poursuivrons par une **analyse a priori** : nous allons repérer un certain nombre de variables non fixées par les contraintes qui nous paraissent pertinentes par rapport au processus d'apprentissage.

Nous nous situerons dans une **perspective constructiviste** où l'enseignant doit faire en sorte que l'élève s'engage dans la construction de ses connaissances. Pour cela il lui proposera des situations que l'élève analysera à l'aide de ses représentations. Si la situation est bien adaptée à l'état initial de l'apprenant elle devrait déboucher sur une observation paradoxale pour lui, lors du test de ses hypothèses. La situation problème proposée conduira l'élève à se poser des questions, première étape de la construction d'une connaissance nouvelle en interaction avec le phénoménal, les autres et le maître. Comment ? Nous retiendrons quatre hypothèses :

1° Hypothèse : si l'apprentissage est une construction, nous partageons l'idée qu'une construction nécessite des fondations, aussi pensons-nous que cet apprentissage sera d'autant plus solide qu'il s'appuiera sur des connaissances antérieures. Il nous apparaît donc essentiel de nous assurer de la maîtrise des prérequis avant tout nouvel apprentissage.

2° Hypothèse : « toute connaissance étant une réponse à une question » il nous paraît important de rencontrer les questions que l'élève se pose au sujet du circuit électrique. Nos études montrant une grande sensibilité aux échanges énergétiques dont le circuit est le siège, nous faisons choix de les aborder en début d'apprentissage, escomptant ainsi évacuer un certain nombre de points de blocage.

3° Hypothèse : les élèves se sont révélés dépourvus de représentation un tant soit peu construite à propos des principaux concepts relatifs au circuit électrique. Nous voulons que l'élève arrive à en parler autrement que par des relations mathématiques. Pour aider à la mise en place d'une représentation plus concrète, nous choisissons d'en faire une approche qualitative.

4° Hypothèse : nous cherchons à ce que chacun des concepts (l'intensité I , la différence de potentiel U , la résistance R et le circuit perçu comme un système en interaction) acquiert du sens pour l'élève. Aussi nous tenons à les introduire, dans un premier temps, chacun de façon indépendante, quand le besoin s'en fera sentir, au fur et à mesure de la progression de notre démarche.

Ces hypothèses piloteront la construction puis le déroulement de la séquence. De leur mise en oeuvre nous attendons l'acquisition d'un nouveau savoir par expérimentation en situation de classe. Elle ne se départit pas ici de la réalisation d'une ingénierie de production dont les résultats méritent d'être éclairés à la lumière d'une expérimentation dans plusieurs classes. C'est pourquoi cette séquence, expérimentée en premier par le chercheur seul, puis par d'autres enseignants de son lycée, sera ensuite testée par des enseignants d'autres académies.

L'analyse a posteriori permettra une évaluation par un processus de validation interne. Ce retour sur les hypothèses sera effectué sur quelques classes de diverses académies. Nous échappons ainsi aux critiques qui pourraient être faites à une étude de cas.

Les traces laissées par les élèves au cours de l'apprentissage, devraient nous révéler quelques unes des étapes par lesquelles passe la construction des raisonnements à propos du circuit électrique.

Pour finir une prise de repères externes devrait permettre de préciser en quoi la connaissance construite avec cet enseignement peut se révéler différente de celle acquise avec un autre enseignement.

Première partie

ANALYSES

Chapitre I

ANALYSES PREALABLES

A - Analyse de l'enseignement habituel et de ses effets

I – Analyse de l'enseignement habituel

Avant d'entamer toute réflexion, il paraît utile, en lien avec le programme d'électrocinétique en classe de seconde :

- de situer les compétences exigibles à l'entrée en seconde, à partir des textes concernant le collège, telles qu'elles se trouvent énoncées dans les documents ministériels d'une part, et dans les manuels d'autre part. La lecture des programmes et manuels du collège se fera en recherchant leur compatibilité avec la possibilité d'une construction de savoirs et en analysant les difficultés prévisibles : le but est d'essayer de se faire une idée de ce que l'élève pourrait avoir acquis comme savoir-faire expérimental et comme connaissance déclarative ou procédurale lors de son arrivée en seconde. L'état des connaissances à l'entrée en seconde fera l'objet d'un état des lieux qu'il conviendra d'établir avant de débiter un nouvel enseignement ;
- puis de connaître les objectifs assignés à l'enseignement de l'électricité en seconde, à partir des documents officiels et manuels scolaires. Cette analyse permettra d'avoir une première idée de l'enseignement suivi par la population d'élèves qui servira de référence lors de la prise de repères externes, et que nous nommerons « enseignement habituel ».

1 - L'électricité au collège

1 - a – Le programme du 10 Juillet 1992 pour la classe de quatrième

Objectifs généraux de l'enseignement de la physique au collège et au lycée

Nous retiendrons les objectifs et commentaires qui éclairent le mieux l'esprit et les buts poursuivis :

- développer chez l'ensemble des élèves « *des éléments d'une culture scientifique* » ;
- au travers de la démarche expérimentale, il doit « *former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle* ». « *Se faisant avec des sujets et des expériences attractives, il doit susciter la curiosité* » ;
- l'enseignement doit faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en montrant que « *le monde est intelligible ... et que l'extraordinaire complexité de la nature, peut être décrite par un petit nombre de lois physiques au caractère universel, dégagé de l'objet, qui constitue une représentation cohérente de l'univers* » ;
- cette organisation cohérente est enracinée dans l'expérience : « *les activités expérimentales ont une place essentielle* ».

Compétences exigibles en électricité, en fin de classe de quatrième

On attend que l'élève sache :

1° - au sujet du courant :

- « *réaliser des circuits fermés ...*
- *identifier et réaliser des montages en série et en parallèle ...*
- *mesurer une intensité, une tension*
- *identifier les pôles d'une pile, mesurer la tension entre ses pôles en circuit ouvert ...*
- *montrer que le courant qui traverse la pile dépend du circuit* »,

avec comme activité support « *des allers retours entre réalisation et schématisation pour des circuits simples.* »

2° - au sujet de l'intensité et de la tension :

- « *vérifier la conservation de l'intensité et l'additivité des tensions le long d'un circuit série*

- *montrer expérimentalement que si l'on change l'ordre des éléments d'un circuit série, on ne change aucune des grandeurs qui les concernent*
- *montrer de même qu'en changeant le circuit, par exemple en rajoutant une lampe en série, les valeurs des grandeurs changent, mais les lois demeurent*
- *reconnaître qu'il peut y avoir une tension importante entre deux points entre lesquels il ne passe aucun courant, et inversement, qu'un dipôle peut être parcouru par un courant sans tension notable à ses bornes (fil de connexion, diode)*
- *utiliser une diode pour déterminer le sens d'un courant ou imposer une absence de courant. »*

1 - b – Le programme du 3 Novembre 1993 pour la classe de troisième

Objectifs généraux

Aux objectifs de la classe de quatrième, viennent s'ajouter des objectifs propres à la classe de troisième :

- prendre l'habitude d'évaluer des ordres de grandeur et par là même de comparer des valeurs numériques entre elles,
- modélisation d'un phénomène à l'aide d'une loi générale...

L'essentiel de ces activités suscitent chez les élèves, questionnement, recherche méthodique, découverte et appropriation de concepts nouveaux et de propriétés nouvelles. L'enseignement aura atteint son but s'il contribue à développer chez les élèves l'appétence de connaissance.

« La présentation insiste sur les savoirs-faire expérimentaux à acquérir, en particulier la manipulation d'appareils de mesure... La manipulation est ... destinée ... à l'acquisition progressive des concepts : la réflexion doit être associée à l'action. »

Compétences exigibles en électricité, en fin de classe de troisième

Le programme de troisième s'inscrit dans la continuité du programme de quatrième et commence par des rappels sur tension et courant continu. *« On attend que l'élève sache :*

- *que les porteurs de charge sont des électrons libres dans les métaux et des ions dans les solutions conductrices ;*
- *utiliser un ampèremètre, un voltmètre ;*
- *appliquer la loi d'Ohm. »*

1 - c – Les capacités à évaluer en sciences physiques

Les capacités à évaluer (Bulletin Officiel de l'Education Nationale, 1987) donnent une indication sur la façon de conduire un enseignement, c'est pourquoi nous allons les rappeler :

Connaissances spécifiques aux sciences physiques

- Connaissances scientifiques : vocabulaire, symboles, unités ; ordres de grandeur ; définitions, lois, modèles.
- Connaissances de savoir-faire :
 - o Dans le domaine expérimental : connaissance fonctionnelle du matériel, connaissance de méthodes d'expérimentation et de mesures, maîtrise gestuelle, respect des consignes, en particulier de sécurité ;
 - o Dans le domaine théorique : utilisation de méthodes, par exemple pour résoudre certains problèmes.

Connaissances et savoir-faire non spécifiques aux sciences physiques

- accéder aux connaissances au moyen de différentes sources ...
- utiliser la langue française : compréhension d'un énoncé, manipulation du langage scientifique ;
- utiliser les outils mathématiques...
- utiliser d'autres outils : ... dessin et schémas...
- pratiquer une démarche scientifique, dans une situation voisine d'une situation connue, ou dans une situation inconnue, dans le domaine théorique ou dans le domaine expérimental, notamment :
 - o observer et analyser un fait expérimental ...

- choisir ou élaborer un modèle physique, ou préciser les limites de validité d'un modèle ;
- organiser les étapes de la résolution ... en organisant connaissances et savoir-faire appris ;
- porter un jugement critique sur un résultat, une série de mesures, l'utilisation d'un appareil...

1 - d – Les caractéristiques de ces programmes

Nous ne nous intéressons qu'aux apprentissages qui pourraient constituer une base aux concepts que nous souhaiterions voir construire par nos élèves de seconde.

P.Fréchengues et J.M.Dusseau (1996 a) ont utilisé comme critère d'analyse « *la fréquence d'utilisation de certains termes dans les programmes officiels d'électricité de quatrième et troisième* ». Ils trouvent une fréquence de :

- 44 pour la tension et 0 pour le potentiel
- 9 pour l'intensité et 13 pour le courant
- charges + termes dérivés 22 + 10 et 9 pour l'électron
- 15 pour la puissance et 11 pour l'énergie
- 2 pour la résistance

ce qui les conduit aux remarques suivantes :

- « *le concept de tension a été voulu central ... il est massivement utilisé, ... par contre le concept de potentiel n'y figure absolument pas*
- *le concept de charge... occupe une place très importante*
- *le concept d'électron n'est pas utilisé dans les compétences de 4° et figure une seule fois en 3°*
- *les concepts de courant et d'intensité figurent dans les compétences de 4°, ils ont disparu de 3°*
- *les concepts de puissance et d'énergie sont utilisés en 3° et largement commentés*
- *le concept de résistance figure une seule fois dans les compétences de 3°* ».

Une autre approche pourrait se faire par l'étude des verbes employés, c'est à dire des actions mises en oeuvre dans la construction des connaissances. La fréquence maximale est pour les verbes :

- mesurer, vérifier, reconnaître, utiliser. Puis
- réaliser, identifier. Enfin
- montrer.

Avec cette grille, il n'apparaît :

- **aucune référence à un savoir antérieur de l'élève**, si ce n'est implicite au raisonnement séquentiel (encore faudrait-il que l'enseignant en ait entendu parler) : « *si on change l'ordre des éléments d'un circuit série on ne change aucune des grandeurs qui les concernent.* » Avec J.L.Canal (1996) nous constatons que les conceptions de l'élève « *qui ne sont autres que des essais de recherche de causalité ne sont jamais prises en compte et rien ne lui est proposé pour les conforter ou les infirmer.* »
- **aucune réelle construction de concept** : des aptitudes expérimentales, liées à l'intermédiaire conceptuel que peut représenter le schéma, des mesures et une mise en application de lois, ce qui correspond à la description de A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais (1998) : « *la conception des programmes reste toujours la même : une liste de notions organisées autour de lois fondamentales.* »

Ces programmes semblent bâtis sur des postulats comme :

- « *la mesure d'une grandeur inconnue permet de la conceptualiser* » (J.L.Canal, 1996), or nous pensons que « *l'acte de mesure ne suffit pas à donner du sens à la grandeur mesurée, n'aide pas à la construction du concept.* » (M.F.Missonnier ; 1996 b) aussi serons nous conduits à repenser la part que peuvent prendre les travaux pratiques dans la construction de connaissances : dans les programmes, ils semblent cantonnés à la mesure et la mise en application de lois, ce qui en réduit l'intérêt, d'autant que l'élève peut les mener à bien et n'avoir rien appris.
- ou que « *les élèves peuvent accéder aux concepts uniquement par un traitement des expressions symboliques* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p. 62), ce qui correspond à ce que P.Bergé (1997) constate : « *on considère que l'on ne peut enseigner que ce que l'on peut habiller d'un formalisme mathématique* ». Pour notre part nous sommes conduits à penser que dans un premier temps, l'enseignement de la physique devrait être fondé sur des observations qualitatives jugées paradoxales, comme J.L.Canal (1996) en suggère une : « *le courant se divise en deux et pourtant la lampe brille pareil ... paradoxe et interrogation ...* » pour mettre l'élève en recherche d'explication : pourquoi ? L'enseignement décrit semble réduit à un formalisme excessif où des

expressions vides de sens maintiennent une incompréhension des phénomènes et permettent à l'élève de conserver ses représentations.

Nous remarquons qu'il est demandé aux professeurs de « montrer » qu'en changeant de circuit, les lois sur les courants et les tensions demeurent. Nous partageons avec J.L.Canal (1996) l'idée que « *montrer n'est pas construire* », ce que signifiait G.Bachelard (1986) lorsqu'il écrivait : « *l'intérêt de construire dépasse de beaucoup la curiosité de constater* ». La résistance des représentations des élèves a été décrite par de nombreux didacticiens. Nous aurons l'occasion d'expliquer pourquoi une simple « monstration » ne les fera guère évoluer : l'élève ne peut pas aussi vite s'approprier une connaissance nouvelle car l'acte d'apprendre, ne consiste pas simplement à enrichir des conceptions mais nécessite une transformation plus radicale qui ne peut se faire que si certaines conditions se trouvent réunies.

J.L.Canal (1996) ajoute : « *les élèves ne peuvent interpréter ces résultats, même à un niveau élémentaire. Il leur manque des éléments :*

- *malgré toutes les mesures qu'ils auront pu faire, ils ne disposent d'aucune image mentale de la tension : elle reste énigmatique et, à leurs yeux ... inutile.*
- *La grandeur « résistance » n'est pas construite en classe de quatrième puisque l'effet Joule est étudié en troisième.*
- *Une grande absente : la grandeur « énergie ». Elle apparaît dans le programme de troisième mais de façon très fugitive. »*

Par ailleurs, J.M.Dusseau et J.M.Fréchengues (1996 a) dans leur analyse soulignent :

- « *le caractère central du concept de porteur de charge* », concept essentiellement abstrait par rapport aux électrons dans les conducteurs métalliques, qui fonctionne bien parce que les élèves s'en servent comme d'un substitut concret.
- et deux difficultés :
 - o « *une algébrisation explicite ou implicite (il existe deux groupes de porteurs de charge)* » qui constitue selon eux « *une importante difficulté pour les élèves de l'enseignement secondaire* »
 - o « *l'obstacle microscopique, qui en identifiant ces porteurs à des électrons, des ions ... soulève le problème de la correspondance implicite des causes et des effets dans des domaines de connaissances radicalement éloignés dans cette échelle.* »

Par nos questionnaires préliminaires à l'élaboration de la séquence nous aurons l'occasion d'éprouver ces remarques et de soulever d'autres difficultés liées à d'autres implicites de cet enseignement.

1 - e – Analyse de manuels scolaires

Pour notre part, nous avons feuilleté le livre utilisé dans notre établissement, à savoir le « Nathan ».

- Il fournit un « *modèle pour expliquer l'électrisation de la matière : les porteurs de charge* »,
 - o puis définit un circuit électrique en écrivant tout d'abord « *un courant circule d'une borne à l'autre de la pile, passe dans le filament, le rend ...* » puis « *retenons : une chaîne continue de dipôles comportant au moins un générateur est un circuit électrique.* » et d'ajouter :
 - o « *un courant électrique peut circuler seulement si le circuit électrique est fermé.* »
 - o il fournit les symboles normalisés de chaque élément puis d'un circuit ouvert ou fermé conformément aux directives : « *l'activité de schématisation prend une place importante : les élèves y manipulent des représentations symboliques codées comme ils l'ont encore peu, sinon jamais, fait.* »
 - o il parle du sens du courant, et définit la diode : « *la diode est un dipôle qui ne laisse passer le courant que dans un sens.* »
- Pour la tension, il indique comment mesurer la tension entre les bornes d'un dipôle en précisant « *la tension d'un générateur est inscrite sur le boîtier. Elle est caractéristique de l'appareil.* »
 - o il parle de la « *tension nominale d'une lampe qui est sa tension d'utilisation.* »
 - o il donne les propriétés en circuit fermé ne comportant qu'une seule lampe, en circuit série, puis pour des récepteurs en dérivation, enfin pour des piles en série.
- Pour l'intensité, il indique comment la mesurer, parle de l'effet du courant sur la température d'un conducteur : « *si l'intensité augmente dans un filament de lampe, la température du filament augmente également* »,

- puis parle d'un montage à ne pas faire : le court-circuit, et de la nature du courant électrique : « le courant électrique est dû à la circulation d'électrons libres dans les conducteurs. »
- enfin après des rappels sur les montages série et dérivation, il affirme que « le courant dans un circuit est caractérisé par son intensité, l'intensité étant la même le long d'un circuit série », alors que « dans un circuit en dérivation l'intensité du courant électrique dans la branche principale est égale à la somme des intensités dans les branches dérivées. »

Or le programme stipule « les éléments conceptuels essentiels dont un début d'acquisition est visé sont les suivants : ces deux grandeurs sont différentes et ne constituent pas deux facettes plus ou moins équivalentes d'une même notion (l'intensité par exemple) ».

L'analyse de la démarche de ce livre permet de se poser la question du stade d'acquisition de ces concepts. Le programme nous apparaît, il est vrai, bien ambitieux pour une première approche, aussi le manuel en reste-t-il à « l'approche totalement opérationnelle. Il s'agit de faire manipuler l'élève, et de l'amener à réaliser des mesures à l'aide de deux appareils qui ne se branchent pas de la même manière. »

Ce constat nous amène à partager l'analyse de J.L. Canal (1996) qui affirme « les élèves assistent de fait à une suite de leçons de choses, à une leçon de mots : une présentation de phénomènes et de résultats où les grandeurs physiques sont imposées et non construites ... Tout est donné, rien n'est construit : nous proposons à nos élèves une simple information sur les résultats de la science. Nous sommes en contradiction avec les objectifs généraux tels qu'ils sont libellés :

- former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique,
- montrer que le monde est intelligible. »

Cette analyse se trouve complétée par G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993) :

« les stratégies employées dans les manuels tendent :

- d'une part à valoriser le langage et le formalisme mathématique dans l'accès aux concepts, ... mais en l'absence de représentations mentales ces expressions restent vides de sens ... ou conservent celui mis avant ;
- d'autre part à négliger le processus de généralisation : les généralisations rapides proposées aux élèves laissent croire que la généralisation ne pose pas de problème. Ceci permet de comprendre que :
 - les élèves ne soient pas attentifs à la recherche de conditions permettant la généralisation ou que
 - sanctionnés par des généralisations abusives, ils en viennent à une prudence excessive : les relations qu'ils connaissent ne sont utilisables que dans des cas voisins de ceux déjà rencontrés.

Il est indispensable de faire pratiquer aux élèves les démarches qui permettent de s'assurer de la légitimité de l'usage des concepts. »

2 - L'électricité au lycée

2 - a – Le programme publié au B.O. hors série du 24 Septembre 1992

Objectifs d'ensemble

« Faire comprendre au travers d'une physique vivante qu'elle contribue à rendre notre monde intelligible, elle permet de l'expliquer avec un petit nombre de lois, valables dans leur domaine d'adéquation et elles permettent de prévoir et d'imaginer des phénomènes ou des objets nouveaux.

Cet enseignement doit laisser aux élèves le temps d'apprendre à travailler :

- acquisition ou amélioration des méthodes de travail
- pratique des sciences expérimentales. »

Compétences exigibles de la partie électricité, courant continu

« On attend que l'élève sache :

- ... que la tension est une grandeur algébrique ...
- la loi d'additivité des tensions

- que deux points d'un circuit reliés par un fil de cuivre sont pratiquement au même potentiel
- distinguer un générateur de tension d'un générateur possédant une résistance interne et définir le schéma électrique équivalent
- que la tension est une mesure d'un état électrique ne serait-ce pas plutôt le potentiel ?
- que tension nulle ne signifie pas nécessairement intensité nulle
- qu'intensité nulle ne signifie pas nécessairement tension nulle
- la loi des nœuds et sa signification physique : loi universelle de conservation de la charge
- la loi d'Ohm pour un conducteur Ohmique
- le rôle d'un rhéostat
- les lois d'association des résistances. »

Commentaires

« Cette première partie correspond aux deux objectifs suivants :

- mettre au point la formulation et l'exploitation méthodique des lois fondamentales concernant tension et intensité déjà rencontrées dans les programmes de 4° et de 3°. Par rapport à ces programmes, aucun concept nouveau n'est introduit. Il s'agit d'un approfondissement des concepts tension et intensité ... et également de l'assimilation des lois indiquées ;
- donner les outils nécessaires à l'analyse de la partie sur les sons. »

Nos remarques concernant ce programme de seconde

En seconde un modèle de courant est préconisé : « débit des charges et sa conservation ». Pour la tension, il est proposé d'« associer une différence d'états électriques, telle que dans le cas d'une résistance, le débit est proportionnel à cette différence. » On peut se demander en quoi « la différence d'états » aidera à la compréhension de la grandeur ? Les commentaires sur les programmes précisent que cette approche « s'appuie sur une introduction très opérationnelle des concepts tension et intensité et que l'assimilation de ces concepts est plus un but de cette partie qu'un acquis préalable : c'est en travaillant sur des montages que, petit à petit, les lois de base se mettront en place. »

Nous constatons une continuité avec l'approche observée en collège : les appareils de mesure devraient suffire à bâtir les différents concepts qui remplaceraient la vague notion de courant ou d'électricité ... A nos yeux c'est méconnaître la complexité de la tâche. Comme l'écrit J.L.Canal (1996) « à notre avis, ce travail sur les montages peut permettre une certaine familiarisation avec les lois, mais non leur conceptualisation. »

2 - b – Analyse de manuels pour la classe de seconde

J.L.Canal (1996) s'est intéressé à ce qu'ils proposent comme définition des concepts et observe : « conformément aux instructions, le courant électrique entre deux points apparaît comme l'effet de la tension électrique appliquée entre ces deux points ».

Il repère un ouvrage qui s'appuie sur une analogie hydraulique (Nathan) « le courant circule de M à N parce que du point de vue électrique, les points M et N ne se trouvent pas dans le même état. C'est l'analogie avec la circulation de l'eau dans une chute qui nous conduit à cette affirmation ... De la même manière que l'eau de cette chute s'écoule de haut en bas parce qu'il existe une dénivellation entre les niveaux supérieur et inférieur, un courant électrique circule entre deux points d'un circuit parce qu'une tension existe entre ces deux points. » et fait la remarque « il nous semble souhaitable de dépasser le simple stade de l'observation de l'analogie : si elle est proposée il faut la choisir et la travailler. »

Le concept d'intensité n'est mentionné qu'en référence à la tension : il apparaît pour une part implicite, mais « on attend que l'élève sache » s'en servir. On est en droit de se demander dans ces conditions, comment l'élève pourra concevoir intensité et tension comme deux grandeurs différentes, objectif, rappelons-le, du programme de 4° ... Quant au concept de résistance il n'apparaît qu'à propos de la résistance interne d'un générateur et des lois d'association des résistances, c'est dire la part d'implicite à son sujet ...

Par ailleurs, nous avons demandé à nos élèves, en cours d'apprentissage avec la séquence, de commenter la propriété suivante de l'intensité trouvée dans leur livre (Nathan, 2°) :

« L'intensité du courant a la même valeur en tout point du circuit. »

Ils ont su trouver les limites de cette affirmation, plutôt surprenante... L'auteur le penserait-il vrai quelle que soit la géométrie du circuit ? Cet énoncé nous choquait, son imprécision conduisant à la généralisation abusive de ce que l'on souhaite voir construire par l'élève sur le circuit série, était susceptible de favoriser la représentation à courant constant, et de conforter ceux qui, naturellement, violent la loi des nœuds pour diverses raisons.

II – Ce qu'on serait en droit d'attendre de l'élève qui arrive en seconde

1 – A la lecture des programmes

Les programmes du collège font référence à l'acquisition de savoirs dans le domaine expérimental et dans le domaine théorique :

1 - a – Savoirs-faire expérimentaux attendus de l'élève qui entre en seconde

L'enseignant peut s'attendre, à la lecture des programmes, à ce que l'élève qui arrive en seconde ait acquis :

- une certaine habileté expérimentale :
 - savoir construire un circuit à partir d'un schéma
 - savoir mesurer une intensité à l'aide d'un ampèremètre ou une tension à l'aide d'un voltmètre ou de l'oscilloscope : place de l'appareil et calibre
 - et une sensibilisation à la dimension sécurité.
- qu'il sache identifier si des dipôles sont montés en série ou en dérivation, et à partir de là appliquer des lois formelles.

1 - b – Modélisation de l'électrocinétique de l'élève qui arrive en seconde

On pourrait s'attendre à la lecture du programme de troisième, à ce que l'élève qui arrive en seconde ait peu à peu construit les concepts utiles à la modélisation d'un phénomène électrique à l'aide des concepts du physicien, et sache appliquer la loi d'Ohm, étant donné qu'il s'agit de :

« mettre au point la formulation et l'exploitation méthodique des lois fondamentales concernant tension et intensité, déjà rencontrées dans les programmes de 4^e et 3^e. Par rapport à ces programmes, aucun concept nouveau n'est introduit. Il s'agit d'un approfondissement des concepts tension et intensité, courant continu... et également de l'assimilation des lois indiquées. »

L'enseignant naïf, qui arrive sans avoir jamais vu un élève de seconde préparer son cours en s'imaginant n'avoir qu'à faire de brefs rappels, des révisions, pour disposer *« des outils nécessaires à la partie sur les sons »*.

2 – A la lecture des manuels

Celle-ci permet d'approcher un peu mieux la réalité de l'élève qui arrive en seconde, sans toutefois l'atteindre. On a pu observer lors de cette étude que :

- la chaîne conductrice du circuit n'est décrite qu'à l'extérieur de la pile. Si on ajoute à cet implicite le symbole jusque là conventionnel de la pile, on peut se demander si pour l'élève, le circuit se ferme à l'intérieur de la pile ;
- les concepts I et U ne sont jamais définis, ils sont mesurés et possèdent des propriétés... facilement interchangeables, mathématiquement parlant...
- le concept de résistance est absent, sauf comme terme de proportionnalité de la loi d'Ohm !

Aussi s'attend-t-on à l'entrée en seconde que l'élève :

- ait une certaine idée du circuit fermé formé de conducteurs en contact, avec toutefois une inconnue à l'intérieur du générateur,
- une absence de concept de système en équilibre, de régime permanent...
- des représentations variées du circuit électrique avec des notions sur l'intensité, la tension et la résistance ... aussi comptons nous passer un questionnaire pour établir un réel état des lieux.

3 – A la lumière des analyses

P.Fréchengues et J.M.Dusseau (1996) ont pour leur part étudié les représentations du concept d'électron en seconde : *« pour deux tiers des élèves l'électron est lié à une représentation de l'atome et très rares sont*

ceux qui se réfèrent à la présence ou à la circulation d'électrons dans un fil. » Cette observation laisse supposer que le concept de circulation reste à préciser.

Nous avons observé une continuité dans la démarche préconisée par les programmes du collège et par celui de la classe de seconde, qui faute de suggérer autre chose que des mesures pour acquérir des savoirs, faire des expériences pour vérifier des lois, intéresse peu d'élèves qui vont conserver leur représentation de l'électricité. Nous partageons cette remarque de J.L.Canal (1996) « *c'est une exposition de faits sans aucune explication ... il nous manque une situation-énigme... Dans l'ouvrage de science aucune émergence de sens n'est prévue ... une simple présentation de phénomènes où l'affirmation tient lieu d'explication ... l'élève est conduit à envisager que ses propres difficultés à comprendre sont liées à son manque de compétence vis à vis des sciences.* »

On assiste, de fait, à la transmission d'une science à mémoriser, pas à comprendre, faite de formules et on aurait envie d'ajouter « magiques, sorties d'un grimoire (le manuel scolaire), dont l'utilisation a l'effet magique de faire monter la note » ce qui n'a rien à voir, ni avec la science, ni avec une quelconque construction de savoir. Il nous semble donc que l'élève ne peut acquérir qu'un « savoir de mémoire », conformément au credo d'un collègue résumant ainsi sa pédagogie : « *je crois en la vertu du rabâchage.* »

Les analyses précédentes des programmes complétées par la lecture des manuels nous permettent d'émettre des réserves sur les acquisitions au niveau des concepts de l'électrocinétique par l'élève qui arrive en seconde. Pour savoir sur quelles bases établir la séquence, nous considérons devoir passer un questionnaire préliminaire.

Nous allons maintenant préciser les méthodes d'apprentissage utilisées dans l'enseignement, tel qu'il se pratique généralement :

III – La méthode d'apprentissage dans l'enseignement habituel

1 - Essai de description par les enseignants eux-mêmes

Nous avons fait passer nos questionnaires (avant et après enseignement de l'électricité en seconde) à tous les élèves d'un même niveau d'enseignement d'un lycée de Corrèze afin d'avoir des repères extérieurs à la séquence. Nous avons cherché à nous faire une idée de l'enseignement suivi par ces élèves, que nous avons appelé « enseignement habituel ». Pour aider les collègues à nous le décrire, nous leur avons fourni un descriptif rédigé à partir des documents suivants : S.Johsua (1985) ; P.Pinelli & R.Lefèvre (1993) ; M.Guiseppin (1996) et A.Dumas-Carré & M.Goffard (1997).

1 - a – Document fourni :

**Essai de description de l'enseignement des sciences physiques,
tel qu'il se pratique, au lycée.
(classe de seconde)**

L'enseignement est basé sur l'établissement de lois, mettant en relation numérique différentes grandeurs physiques.

Le professeur établit pendant son cours un modèle, soit par une démonstration, soit à l'aide d'expériences. Le plus souvent l'introduction d'une notion nouvelle démarre par une **expérience magistrale** en cours dans le but d'illustrer le concept ou la loi étudiée, de mettre en évidence un phénomène, et permet le cas échéant des mesures quantitatives. Parfois une analogie qualitative vient tenter de donner du sens à ce que l'on vient d'introduire.

EXEMPLE : description de l'électricité en classe de 2° par S.Johsua :

1 – Le courant est mesuré grâce à l'ampèremètre. Le modèle corpusculaire de l'électron intervient alors pour fournir une interprétation : la nature électronique du courant électrique.

2 – La tension, notion primaire au contenu inexistant : son effet visible est exactement celui du courant dans un circuit (du à la linéarité de la loi d'Ohm). On confond l'effet et sa mesure. Le voltmètre définira

l'existence d'une tension en même temps qu'il permet sa mesure. (des auteurs font appel à des métaphores analogiques pour suppléer à l'absence de contenu et de sens de la notion introduite)

3 – *La résistance, introduite par le tracé de caractéristiques de conducteurs Ohmiques $I = f(U)$ ou $U = f(I)$ à l'aide d'une succession de mesures. La notion de résistance est définie comme facteur de proportionnalité dont l'existence n'est que constatée.*

L'apprentissage est ensuite censé se renforcer par des expériences permettant aux élèves de répéter, de vérifier et d'appliquer. Exemples d'activités expérimentales réalisées par les élèves :

- activités expérimentales destinées à vérifier un modèle élaboré en cours :
 - o la question serait : « telle loi est-elle vraie ? », qui peut être déplacée vers les limites de validité du modèle
 - o la question deviendrait : « telle loi est-elle toujours vraie ? » ;
- activités expérimentales exploitant un modèle, qui propose de déterminer les valeurs d'un paramètre x en utilisant un modèle ;
- activités expérimentales permettant de construire et de structurer un modèle, activité qui part d'une question, les élèves ayant la charge (en partie ou en totalité, en fonction de leurs connaissances) de la mise au point du protocole expérimental, de sa réalisation et de l'exploitation des résultats.

La compréhension et la manipulation de ces lois nécessitant la maîtrise de certains outils mathématiques, tels la linéarité, la proportionnalité ... (niveau 2°), l'apprentissage se poursuit par des **exercices** d'abord en relation avec l'activité expérimentale, puis faisant appel à d'autres situations, occasions de réinvestissements. « *L'activité de résolution de problème serait, avec le cours magistral la situation la plus fréquente dans l'enseignement des sciences physiques. Les problèmes sont résolus par les élèves, soit en classe pendant les cours, comme application, soit chez eux comme devoir, et pour les contrôles.* » (A.Dumas-Carré et M.Goffard, 1997)

Les premiers participent à l'apprentissage, les derniers à l'évaluation. **Le but de l'enseignement semblerait être de savoir résoudre un problème**, aussi l'élève chercherait-il à se construire une bibliothèque de problèmes types associés à leur solutions...

Maintenant je viens solliciter ton aide : cette description correspond-elle à l'enseignement tel que tu le pratiques, peut-être plus particulièrement pour l'électricité, est-ce bien ta démarche, sinon peux-tu me préciser :

- *en quoi te retrouves-tu dans ces affirmations ?*
- *et en quoi te heurtent-elles ?*

Ton témoignage est précieux pour moi, il restera anonyme, mon enquête ne se voulant ni indiscrète, ni dans un but d'évaluation !

1 - b – Réactions recueillies

Seuls trois collègues ont bien voulu répondre, dont deux (A et B) sur les quatre dont les élèves avaient rempli les questionnaires et nous servant de population témoin et un nouveau collègue plus jeune (C). Voici leurs réactions :

Collègue A

« Globalement en accord avec ce qui est dit, mais pas du tout satisfaite des trois dernières lignes.

Je pense effectivement qu'il est totalement utopique de vouloir faire découvrir systématiquement les lois de la physique à nos élèves qui ne sont ni des petits Newton ou Einstein ou Ampère. Je crois qu'il est toujours nécessaire de guider les expériences – surtout compte tenu des horaires. S'il faut découvrir il faut du temps.

Les exercices me paraissent aussi indispensables pour que les choses se fixent dans les mémoires dans la durée.

Le but cependant est certainement de faire comprendre les phénomènes et de former les esprits à une démarche scientifique applicable à une situation différente de celle rencontrée et c'est bien là le plus difficile à réaliser. »

Collègue B

1 - « *La notion de résistance est définie comme facteur de proportionnalité dont l'existence n'est que constatée* »

On ne peut se limiter à cette définition de la résistance. Il faut leur faire comprendre le rôle de R. (on peut utiliser les caractéristiques. Pour une même tension, deux résistances différentes ne laissent pas circuler le même courant...)

2 - « *Le but de l'enseignement semblerait être de savoir résoudre un problème* »

Non, le problème n'est pas le but. Il faut avoir compris les phénomènes étudiés. Un travail de réflexion est nécessaire.

3 - « *activités expérimentales destinées à vérifier un modèle élaboré en cours :*

- *la question serait : « telle loi est-elle vraie ? », qui peut être déplacée vers les limites de validité du modèle*
- *la question deviendrait : « telle loi est-elle toujours vraie ? »*

Dans la mesure du possible on cherche à leur faire proposer ou établir une loi.

Collègue C

Plutôt pas d'accord :

- en T.P., mise en évidence d'un problème ou on pose une question, par exemple :
« ΣR en série ? », ensuite on essaie de répondre à la question en réalisant des manipulations : on dégage une relation. ;
- en cours, on généralise puis on fait des applications numériques.

1 - c – Analyse des réponses

Les réponses obtenues restent imprécises sur ce que représente l'apprentissage de la physique pour l'enseignant et donc le rôle du maître et de l'élève au cours de cette activité. Ils évoquent le rôle des T.P. et / ou celui des exercices. Dans tous les cas, il n'est question ni de concept, ni de modèle ou de représentation des élèves avant enseignement.

Il semble que les collègues, dont les élèves ont eu à répondre aux questionnaires, n'aient pas été heurtés par la démarche proposée. Leurs remarques soulèvent les difficultés qu'ils rencontrent :

« difficile à réaliser... on cherche à leur faire... » compte tenu des horaires.

Le collègue B semble s'appuyer fortement sur l'outil mathématique (caractéristique).

Seul le nouveau collègue C propose une autre démarche qui partirait d'une question à laquelle on essaierait d'amener les élèves à répondre en T.P. avant de généraliser en cours.

Ces exemples de réponses illustrent ce qui est peut-être une **diversité de démarches**, mais surtout **l'ampleur de l'implicite du contrat didactique** de chacun... Aussi notre interrogation persiste au sujet de l'enseignement vécu par ces élèves et nous reprenons notre analyse de travaux de recherche pour tenter de préciser en quoi consiste l'enseignement que nous appellerons « habituel ».

2 – Description de l'enseignement habituel à partir de travaux de recherche

Décrire un enseignement, c'est s'intéresser aux pôles du triangle didactique savoir – maître – élève et aux interactions en présence, c'est à dire aux hypothèses sur l'apprentissage, ainsi décrites par R.Charnay & M.Mante (1990-91) :

« La conception commune considère que l'apprentissage est basé sur l'écoute, l'observation, l'imitation, la reproduction du modèle enseigné. Il faut donc bien écouter, bien apprendre, bien mémoriser et s'entraîner pour pouvoir enregistrer, puis reproduire et enfin utiliser les connaissances. La qualité de l'apprentissage est conditionnée par celle de la transmission : le bon maître est celui qui explique bien. »

Nous allons chercher à préciser les caractéristiques de l'enseignement habituel en nous intéressant successivement aux différents acteurs et aux activités participant à l'apprentissage :

2 - a – Le savoir : nature et mode de transmission

La connaissance scientifique perçue comme un dogme

C'est ce qui ressort d'analyses de chercheurs, telles :

« La science est vécue comme **une vérité révélée** par les savants... elle n'est pas susceptible d'être remise en cause... conduit à une **confusion** entre les **modèles** construits par les savants pour expliquer et prévoir les phénomènes physiques et cette même **réalité**. » (F.Audigier & P.Fillon, 1992)

« La manière de penser la physique... est la suivante : il s'agit d'un **corpus de connaissances établies, reconnues, inquestionnables**. Les modèles... sont le plus souvent considérés non comme des modèles mais comme la **réalité, la vérité**... Les concepts sont présentés comme s'ils avaient toujours existé. » (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997)

Cette idée de la science qui nous apprendrait la « vérité » se trouve alliée à l'absence de distance entre la réalité et sa représentation par notre cerveau à l'aide des concepts.

Une connaissance empirique :

À la lecture des programmes, où les activités expérimentales ont une place essentielle, où la démarche expérimentale consisterait à mesurer, vérifier et surtout à **montrer**, on pourrait imaginer qu'il suffit d'observer la nature pour en déduire ses lois. G.Bachelard (1938), puis T.S.Kuhn (1983), en révélant une autre épistémologie de la science ont lutté contre ce mythe, selon lequel, par exemple, ce serait en observant la chute d'une pomme que Newton aurait eu l'intuition de la loi de l'attraction universelle... Mais en classe, à la lecture du rapport de P.Bergé (1989), on peut imaginer que l'empirisme n'était pas mort à cette date :

« La physique... doit voir son enseignement s'appuyer sans cesse sur l'observation des faits et des phénomènes, on doit privilégier la **méthode inductive** et le recours systématique à l'expérience. »

Pour K.Popper (1988) l'expérience n'affirme jamais, elle ne peut que corroborer ou contredire, mais en classe « la manipulation est destinée à l'acquisition progressive des concepts » (BOEN., 1993)

Cette croyance en une physique qui découlerait d'une observation attentive et en un cerveau prêt à imprimer toute connaissance nouvelle conduit S.Johsua (1985, p.11) à définir ainsi l'**inductivisme** :

« L'**inductivisme** repose sur la **croyance que l'observation et la mesure sont à la base de la mise en évidence des lois physiques** et qu'il est possible de créer un cadre artificiel où l'élève, bien dirigé, serait apte à faire, en raccourci, ce même cheminement... Il y a là une option lourde sur l'épistémologie de la physique qui fut majoritairement admise dès la deuxième moitié du dix-neuvième siècle et n'a cessé de s'approfondir depuis. »

Nous trouverons des arguments à l'appui de ces propos dans les activités du maître comme dans celles de l'élève.

Une connaissance souvent réduite au formalisme

P.Léna (1999) se demande : « Peut-on encore communiquer la science avec la langue de tout le monde ? » car avant elle utilisait « le langage, la langue commune, les mots pour le dire... Puis est venu s'imposer... pour la physique, un autre langage, celui des mathématiques, étranger à la majorité des humains. »

Ce constat de l'expression quasi exclusive de la science à travers une formulation mathématique se retrouve chez de nombreux chercheurs :

- M.Antoine (1982) parle d'« un enseignement essentiellement basé sur l'établissement de lois mettant en relation numérique certaines grandeurs physiques » ;
- G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, pp.62-63) « Les stratégies pédagogiques employées dans les manuels tendent à valoriser le langage et le formalisme mathématique. » ;
- S.Johsua (1985, p.12) « le qualitatif... n'est pas enseigné comme un intermédiaire indispensable au raisonnement » (de résolution de problème) ;
- J.L.Canal (1996) cite R.Thom : « A la fin du 17^e siècle on en était venu à décréter qu'après tout, il n'y avait aucune raison de chercher une explication quand on disposait d'une formule qui marchait bien. Et donc, la physique a adopté ce point de vue selon lequel les formules qui ont du succès doivent être présentées dénuées d'explication. »
- P.Jensen (1997) évoque une science réduite à « un amoncellement de formules » ;
- P.Bergé (1997) constate qu'en physique « on considère que l'on ne peut enseigner que ce que l'on peut habiller d'un formalisme mathématique : d'où un mode de raisonnement qui devient lui-même déductif. »

Une connaissance réduite à l'« opérationnalisme » en électrocinétique

S.Johsua (1985, partie C, p.37-39) analyse la démarche d'apprentissage de l'électrocinétique :

- la notion de circuit fermé est définie à partir du **constat** de l'éclairement de l'ampoule ;
- le courant est introduit par ses effets, dont un seul (l'effet Joule) sera en pratique utilisé..., puis **mesuré** grâce à l'ampèremètre ;
- le modèle corpusculaire de l'électron peut fournir une interprétation ;
- la tension : aucune explication ou interprétation n'est prévue... de plus son effet visible est exactement celui du courant dans un circuit... **confond l'effet et sa mesure**... le voltmètre définira l'existence d'une tension en même temps qu'elle permettra sa mesure... notion au contenu inexistant ;
- la résistance, introduite par le tracé de caractéristiques de conducteurs ohmiques, définie en classe de seconde comme **facteur de proportionnalité**, dont l'existence n'est que constatée...

Cette description illustre la part prise par des grandeurs mesurables, qui ne sont que l'un des aspects des grandeurs physiques, aussi conclut-il : « *au très fort degré d'opérationnalisme de l'enseignement de l'électricité dans l'enseignement actuel. Il n'est guère tempéré que par les références à « la nature électronique du courant ». Cet opérationnalisme reste cohérent avec la démarche inductive... La modélisation n'y affleure même pas* » puis (p.44) « *la modélisation de l'électrocinétique disparaît presque.* »

Remarques :

Entre formules et mesures, on en vient à se demander **quel est le but réel de l'enseignement** de l'électrocinétique qui parle de concepts sans se donner les moyens de leur réel apprentissage ? S.Johsua émet l'hypothèse qu'il soit un « **enseignement prétexte**... Son contenu conceptuel serait considéré comme secondaire au regard d'autres objectifs à atteindre... par exemple...

- *l'hypertrophie donnée à l'apprentissage des instruments de mesure... sert moins à étudier l'électricité, que l'électricité à se familiariser avec un appareil...*
- *l'hypertrophie des tracés de caractéristiques se comprend si on conçoit que l'enjeu réel de cette partie est autant (et peut-être plus) l'apprentissage de méthodes générales de la physique (ici le tracé de graphes et leur lecture) que l'établissement de la loi d'Ohm.* »

Avec un savoir de nature empirique, **pour que l'élève acquiert des connaissances**, il suffirait de lui montrer des expériences « parlantes » où l'observation des phénomènes permettrait de passer du monde perçu au monde pensé.

Une démarche inductiviste est bâtie sur le postulat qui suppose que :

« *ce qui est énoncé clairement par le professeur, s'inscrit tout aussi clairement dans la tête des élèves* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p.183) ce qui conduit à lui exposer clairement des contenus, définitions, lois, procédures et domaines d'utilisation : la pédagogie est axée sur l'apport d'informations par des exposés sur les phénomènes et les concepts. (d'après A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997, p.51)

2 - b – Le professeur

Rôle de l'enseignant

Quelles que soient les hypothèses sur l'apprentissage, le maître a en charge la transmission du savoir et son évaluation. Elles dépendent de son épistémologie de la physique et de sa conception de l'apprentissage.

Suite à l'analyse précédente de ces deux domaines, on peut s'attendre, dans l'enseignement habituel, à ce qu'il corresponde au modèle pédagogique général défini par F.Audigier & P.Fillon (1992, p.62), où la transmission du savoir se ferait selon un modèle pédagogique transmissif de type cours magistral, qui privilégie une démarche de nature inductive, idée qui se retrouve exprimée par des chercheurs :

- « *Le bon maître est celui qui explique bien* » (R.Charnay & M.Mante, 1990-91)
- « *On peut sans grande audace, avancer l'hypothèse que pour une majorité de pédagogues, l'enseignement de la physique se confond avec celui de « la méthode expérimentale »... va le plus souvent de pair avec la réduction de la « méthode expérimentale » elle-même aux processus d'induction.* » (S.Johsua, 1985, p.11)
- « *Le professeur présente les modèles comme s'ils avaient toujours existé. Il ne distingue pas les modèles des faits ou des phénomènes.* » (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997, p.52)

Nous avons abordé la transmission des connaissances au paragraphe précédent. Nous allons expliciter, dans une perspective inductiviste, le rôle de l'expérience et de la résolution de problèmes, activités qui viennent en complément du cours magistral.

Rôle de l'expérience magistrale

D'après l'analyse de S.Johsua (1985, partie B, p.69-71) l'expérience de cours, ou « *expérience prototypique* », qui constitue une première approche qualitative, doit illustrer la « *liaison entre éléments pertinents* » à l'origine d'un prototype d'un prémodèle, mais le souci serait : « *le plus vite possible passer à la mesure* » :

« *La monstration prototypique tend non seulement à « montrer » une grandeur nouvelle par ses effets phénoménologiques, mais à permettre sa mesure.*

Bien entendu le modèle devient la conséquence inévitable de l'expérience prototypique.... qui conduit naturellement à la loi : elle la montre en même temps que les faits, les grandeurs et les moyens de mesurer ces dernières. Facilement mise en évidence, elle sera immédiatement « mise en application » :

- *soit dans des répétitions... de l'expérience de référence ;*
- *soit dans des situations différentes, mais où « la loi » s'applique...*
- *soit dans des exercices formalisés (non expérimentaux). »*

P.Pinelli et R.Lefèvre (1994) aboutissent au même constat :

« *L'enseignement des sciences physiques privilégie encore la démarche inductiviste pour laquelle l'observation est première et fournit une base sûre à partir de laquelle il est possible d'extraire la connaissance scientifique par induction.*

En effet, c'est la plupart du temps à partir d'une expérience de référence, parlante et simple (en apparence), que les élèves par une observation attentive et des mesures soignées, assistent à la mise en évidence d'une loi physique ; l'apprentissage est ensuite censé se renforcer par des expériences permettant aux élèves de répéter, de vérifier et d'appliquer. »

Rôle du problème

L'activité de résolution de problème, est définie par A.Dumas-Carré & M.Goffard (1997, p.8) « *la résolution du problème consiste à élaborer un raisonnement qui conduit de la question à la réponse en utilisant des connaissances déjà acquises.* »

Cette activité peut être mise en oeuvre en cours d'apprentissage ou en évaluation.

L'activité de résolution de problème comme processus d'apprentissage :

« *lorsqu'un élève résout un problème, il le fait en développant un raisonnement mettant en oeuvre des connaissances propres à la physique, connaissances qu'il est en train d'apprendre... Cette construction est un moyen de donner du sens aux connaissances en cours d'acquisition.* » (p.9)

Le rôle du maître est d'aider à la recherche de solutions, puis de fournir une correction. Le plus souvent, elle ne rend pas compte du travail de résolution : la solution présentée est juste, linéaire, compacte et « *élégante* », développe le traitement formel. Elle montre ce qui est attendu de l'élève quand il aura un problème de même type à résoudre en évaluation. Ce sont des modèles de solution révélant les attentes du professeur. (pp.14-15)

Dans ce contexte d'une science vécue comme « *vérité révélée* » par les savants, voyons le rôle réservé à l'élève :

2 - c -- L'élève

L'activité de l'élève en classe est répartie entre le cours magistral, les travaux pratiques et les résolutions de problèmes participant à l'apprentissage ou à l'évaluation. Nous allons analyser ces différents aspects :

L'élève et le cours magistral

Nous avons déjà transcrit les propos de R.Charnay & M.Mante (1990-91) : le rôle de l'élève se résumerait en écoute, observation et imitation : l'élève « *doit bien écouter, bien apprendre, bien mémoriser et s'entraîner pour reproduire et enfin utiliser les connaissances.* »

S.Johsua (1985, partie D, p13) définit lui aussi la place de l'élève : « *l'élève doit se comporter comme un sujet actif, mais cette activité est principalement circonscrite à :*

- *l'observation d'un matériel expérimental présenté par le professeur ou manipulé par lui-même ;*
- *la mesure de grandeurs physiques : cette activité a tendance à résumer le rôle propre de l'élève en classe de physique....*

L'élève doit apprendre le cours et manifester à l'occasion des capacités de « transfert »... à des situations expérimentales nouvelles. »

« Les élèves assistent à une suite de leçons de choses, à une leçon de mots : une présentation de phénomènes et de résultats où les grandeurs physiques sont imposées et non construites... propose aux élèves une simple information sur les résultats de la science. » (J.L.Canal, 1996, p.13-15)

Aussi, l'élève qui apprend son cours, se contente le plus souvent d'un résumé du cours, constitué des « formules » repérées comme utiles lors de la résolution des exercices en classe... Rien n'est fait pour qu'il s'approprie la connaissance scientifique, c'est à dire les concepts :
« On leur demande simplement de nous croire et de les accepter » (M.Scheidecker-Chevalier & G.Laporte, 1998)

Ils ignorent ce qu'est un modèle et la modélisation.

L'élève et les activités expérimentales

L'activité expérimentale est le plus souvent destinée à tester un modèle élaboré en cours, parfois à introduire un modèle, dans tous les cas par des mesures. On peut, comme J.C.Messenger (1987) poser la question
« des mesures pour quoi faire ? »

Elles pourraient servir d'intermédiaire entre le phénomène et l'utilisateur, permettre de caractériser l'état du phénomène et permettre de l'élever au dessus de la perception qualitative et élaborer ou affiner peu à peu un modèle.

Ce chercheur étudie entre autres, le cas de l'ampèremètre, *« où , en le voyant, on peut se demander quel est le phénomène étudié... »* Il explicite une progression partant de la question :

« y-a-t-il du courant » ... et la réponse viendrait de l'éclairement d'ampoules, puis

« y-a-t-il du courant, et quel est son sens » en utilisant la déviation d'une aiguille aimantée en présence d'une bobine, détecteur qui peut être affiné par des graduations qui permettront une comparaison : on pourra dire si le courant détecté est identique, moins fort ou plus fort dans un circuit lorsqu'on ajoute une ampoule en série, en dérivation...et arriver enfin à un appareil plus sophistiqué, à des unités...

« à ce stade, le phénomène se trouve étrangement dissous à la fois :

- *derrière l'abstraction mathématique*
- *derrière l'appareil de mesure.*

Nous ne parlerons plus que de l'évènement qui se déroule lorsqu'il y a action réciproque entre le phénomène et l'instrument de mesure. »

En pratique, dans l'enseignement usuel, la mesure se résume à la dernière étape, qui sert le plus souvent à « vérifier » une loi rencontrée en cours : l'élève sait ce qu'il faut trouver, d'où une attitude passive, ils font ce qu'on leur demande parfois en suivant un protocole imposé... sans se poser de questions. Nous pensons, surtout dans ces conditions, que l'acte de mesure ne suffit pas à donner du sens à la grandeur mesurée, n'aide pas à la construction du concept. On en vient à se demander l'intérêt de ce type d'activité où :

- l'élève sait ce qu'il doit trouver et il le trouve (M.G.Séré, 1995)
- les élèves peuvent passer à travers sans avoir rien appris, car il est possible de les mener à terme sans que le cerveau soit engagé dans le travail (O. & M.Soudani, 1999)

L'élève en activité de résolution de problème

L'activité de l'élève se bornerait *« à appliquer les connaissances reçues, qui privilégient la démarche de type déductif »* (F.Audigier & P.Fillon, 1992, p.32) dans l'activité de résolution d'exercices ou de problèmes.

Il nous semble que pour réinvestir des connaissances, non seulement il faudrait en avoir, (or nous avons vu qu'elles se résumeraient souvent à des formules vides : l'élève sait au mieux remplacer les lettres par des valeurs, sans beaucoup de rigueur quant aux grandeurs considérées ou aux unités employées...) mais aussi très bien les maîtriser, ce qui ne concerne qu'une faible proportion des élèves d'une classe. Pour les autres, il s'agirait plutôt d'un **apprentissage par imitation**, qui n'est pas sans difficulté pour l'élève :

« Il essaie d'imiter le professeur mais n'y arrive pas... pour qu'il y ait comparaison, il faut un début de réalisation, or il arrive souvent que l'élève ne sait même pas comment commencer » peut-être parce qu' *« une représentation qualitative du problème est nécessaire pour le résoudre... or les corrigés n'explicitent pas la représentation du problème »* (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997, pp.16-18). Ces chercheurs rejoignent S.Johsua (1985, partie D, p.13) : *« L'élève doit surtout résoudre des exercices d'application et des problèmes... L'analyse physique de la situation est secondaire, voire inexistante. Tout autre problème sort du contrat*

didactique... Seule cette étape, où domine l'utilisation de l'outil calculatoire subsiste lors des évaluations officielles. »

Ignorant l'étape d'analyse ou de représentation de la situation, l'élève décidé à obtenir un diplôme va chercher d'autres moyens pour réussir aux contrôles de connaissances :

« *Ils vont apprendre des solutions* » (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997, p.14).

En cours le maître fournit des modèles, et l'activité de l'élève là aussi se résume, après s'être bien entraîné sur d'autres exemples, à un travail de reproduction du modèle enseigné. En cas d'erreur, la responsabilité est renvoyée à l'élève qui n'a pas écouté, pas appris... : « *il faut encourager l'élève à travailler (par des récompenses ou des sanctions), recommencer les explications, ... multiplier les problèmes-types.* » (R.Charnay & M.Mante, 1990-91)

En résumé, « formalisme » et « dogmatisme » contre lesquels lutte la littérature pédagogique française concernant la physique (S.Johsua, 1985, p.11) semblent encore caractériser son enseignement avec des conséquences que nous allons aborder :

IV – Les effets de cet enseignement

1 – Au niveau des connaissances de l'élève

1 - a – Une science réduite à des formules

« *De nombreuses études ont montré qu'en général les étudiants n'en retiennent pas grand chose, qu'ils ne voient qu'un amoncellement de formules sans trop de sens... une grande partie des problèmes de l'enseignement de la physique provient de ce que beaucoup d'étudiants ne comprennent pas réellement ses fondements, sa méthode ni même ses concepts de base...* » (P.Jensen, 1997)

Cette affirmation rejoint celle de G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1992, p.62) qui parlent de « *formules vides de sens* », ce que nous avons pu constater lors de l'entretien avec François, à qui nous demandions de définir l'intensité du courant :

« *J'ai dans la tête quelques formules* »

L'élève a conscience qu'il n'y comprend rien, mais il a envie de réussir « d'avoir son bac », alors il cherche des recettes :

1 - b – Une science réduite à des recettes

Pour les élèves de lycée, l'objectif principal des programmes, par la pratique de la démarche expérimentale, semblerait être l'acquisition de lois et de leur domaine de validité. Mais, lorsqu'on se réfère à l'évaluation finale que constitue le baccalauréat comme S.Johsua (1985, partie D, pp.6-7) qui analyse les sujets proposés, on en vient à comprendre la stratégie de l'élève, qui a mémorisé des formules vides mais fort utiles, car dans chaque domaine de la physique il y a un problème type et que « *ce qui est demandé à l'élève est :*

1 – *la connaissance des formules nécessaires pour mener à bien la résolution du problème...*

2 – *la possession de stratégies types de résolution de problème. Ceci ne s'enseigne pas en tant que tel. Les élèves l'acquièrent tant bien que mal par répétition, extension de stratégies déjà utilisées ou analogies avec celles-ci.* »

L'élève repère l'existence de situations-types qui seront apprises uniquement en vue de l'obtention du diplôme... La connaissance se trouve réduite à des automatismes. Les candidats appliquent des recettes scientifiques.

1 - c – Une science dépourvue de modélisation

De nombreux chercheurs ont observé les effets de cet enseignement. Ils ont remarqué :

- « *les sujets débutants manquent de tout modèle d'explication des phénomènes* » (S.Johsua, 1982, p.93)
- « *L'électrocinétique est un domaine où les sujets débutants manquent de tout modèle même fruste* » (1985, p.17)
- « *actuellement manque l'appropriation de modèles non quantitatifs... les formules toutes faites ... deviennent des obstacles à la pensée.* » (J.L.Canal, 1996)

Or, « il n'y a pas de science sans modélisation... si l'on veut pouvoir qualifier de scientifique l'enseignement de sciences physiques dispensé dans les lycées, il est nécessaire que les élèves pratiquent des activités de modélisation. » (M.G.Séré, 1995)

En l'absence de modèle de représentation, les élèves se trouvent pris au dépourvu lorsqu'on leur demande de prévoir ou d'interpréter un phénomène, ce qui éclaire le pourcentage élevé de « sans réponse » à nos questionnaires : ces élèves n'ont pas de réponse à fournir en entretien...

On observe aussi des erreurs récurrentes ayant souvent pour origines :

- les implicites qui perdurent, ou
- les représentations qui persistent, quand elles ne se trouvent pas renforcées par cet enseignement qui les ignore, comme l'a observé J.L.Closset (1983, p. 214) pour le raisonnement séquentiel.

2 – Effets au niveau de la représentation de la physique

chez l'élève comme dans l'imaginaire populaire

Nous avons eu l'occasion de nous poser la question de l'intérêt :

- d'un cours magistral déconnecté des questions des élèves,
- d'un savoir limité à un squelette mathématique, formules et recettes...
- de travaux expérimentaux dépourvus d'initiative, sans parler d'hypothèses à tester ;
- d'exercices qui se limitent à des applications numériques, ou à la répétition du modèle...

Dans ce contexte, nous ne sommes pas surpris du désintérêt croissant de l'élève passif, seulement en quête de formules et de recettes pour réussir, en accord avec le maître qui les lui fournit. Il devient de plus en plus indifférent, voir critique, et dès qu'il le peut s'en désintéresse « *on peut bien vivre sans* ».

Dans l'imaginaire populaire, la physique est un domaine incompréhensible et inaccessible au commun des mortels. Chacun de nous a entendu au moins une fois ce type de conversation :

- « Et que faites vous comme métier ?
- *Professeur*
- Prof ? Et dans quelle matière ?
- *La physique.*
- Ah ! La physique ! (*Les contes d'Hoffmann*, Jacques Offenbach. Acte II) » (F.Saint Jalm, 2001)

Et le maître ? Il se trouve souvent découragé par un travail inefficace... Mais après cette analyse nous pouvons émettre l'hypothèse que **ce n'est pas la science qui n'intéresse pas les élèves, c'est le formalisme et le dogmatisme** hérité des siècles passés. N'existerait-il pas une autre possibilité d'enseignement de la physique qui pourrait enthousiasmer l'élève en lui apportant la réponse à ses questions et le plaisir de comprendre, de découvrir que le monde qui l'entoure peut être intelligible ?

Déjà M. de Montaigne faisait le même constat et suggérait des idées :

« On ne cesse de crier à nos oreilles, comme qui verserait dans un entonnoir, et notre charge ce n'est que redire ce qu'on nous a dit... »

Quelque fois lui ouvrant le chemin, quelque fois le lui laissant ouvrir, je veux qu'il invente et parle seul, je veux qu'il écoute son disciple parler à son tour...

Qu'il ne lui demande pas seulement compte des mots de sa leçon, mais du sens et de la substance... que ce qu'il viendra d'apprendre, il le lui fasse mettre en cent visages, et accommoder à autant de divers sujets, pour voir s'il l'a encore bien pris et bien fait sien... Qu'il oublie d'où il les tient, mais qu'il se les sache approprier....

Savoir par cœur n'est pas savoir : c'est tenir ce qu'on a donné en garde à sa mémoire....

Il n'y a tel que d'allécher l'appétit et l'affection, autrement on ne fait que des ânes chargés de livres. On leur donne à coup de fouet en garde leur pochette pleine de science, laquelle pour bien faire, il ne faut pas seulement loger chez soi, il la faut épouser. »

V - Les objectifs généraux de la chimie

Ces objectifs, nous allons le voir, sont sensiblement différents de ceux rencontrés à propos de la physique. Ils ouvrent des pistes de réflexion pour une autre approche de l'enseignement.

« L'enseignement de la chimie a pour premier objectif de faire acquérir des méthodes propres aux disciplines scientifiques ... :

- découvrir, observer, analyser, mesurer
- raisonner ... :
 - le raisonnement qualitatif où il s'agit moins de savoir utiliser des concepts mathématiques, que de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants. Le qualitatif n'est pas la solution de facilité : il est beaucoup plus aisé de faire un calcul juste qu'un raisonnement pertinent
 - le raisonnement par analogie
- expérimenter
- modéliser : développer l'utilisation d'un modèle, en montrer les limites, le sophistiquer en fonction des besoins ... Toute la rigueur d'une discipline expérimentale est dans la bonne utilisation des modèles qu'elle utilise pour décrire une réalité souvent complexe. Les modèles n'ont nul besoin d'être mathématiques pour être rigoureux. »

Si on se prend à comparer les objectifs officiels assignés à l'enseignement, de la physique d'une part, et de la chimie d'autre part, on réalise qu'ils correspondent à deux hypothèses sur l'apprentissage en sciences :

- en physique, l'acquisition des connaissances s'appuie sur une apparente facilité, simplicité d'un enseignement déductif : on demande aux élèves de nous croire et d'accepter les concepts scientifiques, alors qu'
- en chimie, l'objectif est différent : il est de faire mieux comprendre ce qu'est la science, comment s'élabore réellement la connaissance scientifique, comme si les élèves en avaient besoin pour donner plus de sens à leur apprentissage.

Ces différences visibles résultent de divergences profondes (A. Dumas-Carré & M. Goffard, 1997, pp. 51-54)) à propos des connaissances scientifiques et des processus d'apprentissage :

- pour les uns, il suffirait pour bien enseigner d'être très savant, et pour que les élèves apprennent de leur exposer clairement les contenus : la pédagogie est essentiellement axée sur l'apport d'informations : la connaissance est simplement transmise. C'est ce que S. Johsua appelle « l'idéologie inductiviste » qui repose sur la croyance que « l'observation et la mesure sont à la base de la mise en évidence des lois physiques ». Les concepts sont présentés comme s'ils avaient toujours existé et les modèles comme la réalité ;
- pour les autres, au contraire, l'élève est un sujet connaissant, qui « aborde un enseignement avec une structuration particulière de connaissances. Celle-ci peut correspondre à ce qu'on voudrait lui faire apprendre, elle peut aussi n'y pas correspondre » (S. Johsua, 1985). D'autre part la connaissance scientifique se construit chaque jour à partir d'hypothèses réfutables à valider. Cette image dynamique d'une science vivante associée à la prise en compte de l'élève conduit à une conception de l'apprentissage où il ne suffit plus d'exposer des connaissances à mémoriser, mais où l'activité de l'élève sera centrale : découvrir, analyser, raisonner, expérimenter, modéliser ...

L'enfant passe par l'âge des « pourquoi ? », et l'esprit humain est toujours à la recherche de sens : en mésestimant l'importance du besoin d'explication de l'élève, en ignorant ses représentations et ses questions, en privilégiant l'observation dirigée sans aucune construction modélisante, conformément à ce que laissent entendre les instructions officielles en physique, peut-on satisfaire un jeune esprit avide de comprendre ? Cette interrogation nous a mis en recherche de conditions favorables à l'apprentissage d'un début de modélisation de l'électrocinétique.

B - Représentations des élèves en électrocinétique à l'entrée en seconde

I - Nos connaissances sur les représentations

1 – Définition

Dans un article du « Grand N » nous avons trouvé une définition de ce que les auteurs nomment conception, terme auquel nous préférons celui de représentation, mais surtout qu'ils relient à un concept. Or pour nous, le concept est une catégorie qui appartient au monde du physicien, pas à celui de l'élève. L'élève justifie à l'aide d'entités ou de notions. Il attribue à une notion, comme par exemple l'électricité, des propriétés qui pour le physicien sont des attributs de concepts différents. Voici cette définition :

« Pour un concept déterminé, la notion de conception représente l'ensemble des connaissances locales (correctes ou non) qui sont attribuées à l'élève et qui permettent de rendre compte du fonctionnement réel de l'élève (ses conduites, ses procédures, ses réponses) et de l'expliquer... »

Une seule conception ne permet pas toujours d'expliquer toutes les réponses d'un élève et tout se passe parfois comme si celui-ci mobilisait, selon l'activité proposée, telle ou telle conception. » (R.Charnay et M.Mante, 1990-91)

Nous partageons par contre cette dernière remarque, ainsi que la définition synthétique suivante : *« nous nommons représentation le contenu structuré de la pensée d'un sujet concernant un phénomène ou une classe de phénomènes. »* (S.Johsua, 1985 ; F, p.2) qu'il précise plus loin (S.Johsua, 1985 ; F, p. 4) à l'aide de cette observation de (L.Resnick, 1982-83) : *« les étudiants, les plus faibles comme les plus forts, abordent leurs premiers exposés de sciences avec des « théories » étonnamment précises sur comment marche le monde naturel. Ils utilisent leurs théories « naïves » pour expliquer les événements du monde réel avant d'avoir eu aucune instruction scientifique. De plus, même après avoir été mis en présence avec ces nouveaux concepts et théories dans une classe de science, ils reviennent à leurs théories antérieures pour résoudre les problèmes qui s'écartent des exemples des livres scolaires. »*

Les physiciens ont construit des représentations du monde qui nous entoure, avec des moyens et des méthodes qui ont acquis rigueur et précision au fil des siècles. Mais tout homme est confronté à des événements naturels dans la vie de tous les jours. Pour appréhender le réel par la pensée, l'homme doit s'en faire une représentation. Ainsi, dès leur plus jeune âge, les enfants doivent se représenter mentalement certains phénomènes pour comprendre, d'une façon satisfaisante à leurs yeux, le fonctionnement de leur environnement, représentations qui guident leurs gestes quotidiens.

Lorsque l'enseignant de physique aborde un domaine en choisissant un exemple dans la vie de tous les jours, les travaux des didacticiens ont montré que l'élève a déjà dans la tête des idées sur ce phénomène. Quelque soit le domaine abordé, les chercheurs ont pu observer que :

- dans une même classe il existait un petit nombre de représentations, c'est à dire que spontanément différents élèves avaient formé des représentations voisines, et que
- chaque élève pouvait avoir à sa disposition plusieurs représentations et qu'il faisait appel à l'une ou l'autre selon la question posée.

2 – Intérêt des représentations

Les directives officielles comme la majorité des enseignants ignorent l'existence des représentations : les enseignants se comportent comme s'ils arrivaient sur un terrain vierge de toute connaissance. Nous venons de dire qu'il n'en est rien, le terrain est déjà « cultivé », les élèves arrivent en classe avec un « savoir » acquis dans la vie quotidienne. Quelles implications au niveau des relations entre élèves-maître-savoir peut-on imaginer ?

2 - a – Rôle des représentations

Des idées ont germé dans la tête des élèves pour prendre en compte, expliquer, prévoir une action en présence d'un phénomène naturel :

« Ces représentations sont élaborées par les individus pour anticiper les événements et réguler leurs actions. » (G.Lemeignan et A.Weil-Barrais, 1993, p.7)

En continuité logique avec les définitions précédentes, (S.Johsua, 1985 ; F, p. 3) écrit :

« Ces représentations servent de base active aux raisonnements et conduites des sujets », ce que (R.Charnay et M.Mante,1990-91) expriment par :

« l'élève utilise des règles d'action implicites, des « théorèmes en actes » qui sont compatibles avec cette conception. »

(S.Johsua, 1985 ; A, p. 18) quant à lui précise, ce qui nous paraît très important pour l'apprentissage *« le contenu et le mode d'organisation de la base de connaissance agit comme une grille de lecture de la réalité extérieure. Elle fait le tri entre ce qui lui paraît pertinent ou non, et intègre certaines données sur un mode qui lui est propre »*, ce que A.Benséghir et J.L.Closset (1994) expriment par : *« la connaissance préalablement acquise joue le plus souvent le rôle de cadre interprétatif, voire de prisme déformant au travers duquel sont analysées les expériences nouvelles. »*

Ces représentations interviennent lors du traitement des informations reçues par l'élève comme sur ses observations. On peut s'attendre à ce que l'observation ne soit pas objective, ce qui peut se manifester au moins de deux manières :

- ne pas voir ce qui est inconcevable, même si le fait existe réellement : *« les yeux ne voient que ce qu'ils sont préparés à voir »* (A.Leroi-Gourhan, cité par J.Rosmorduc, 1979, p. 25)
- l'existence d'une corrélation entre ce que l'élève s'attend à voir avant l'expérience et ce qu'il déclare voir pendant, comme l'a par exemple montré F.Chauvet (1994) au sujet de la couleur des objets en fonction de la lumière qui les éclaire.

Il nous paraît important que l'enseignant soit conscient de l'existence de ce filtre de l'information à travers lequel l'élève reçoit les informations qui lui parviennent, que ce soit par un texte, la parole ou l'expérience. Il semble souhaitable que l'enseignant demande souvent à l'élève de reformuler le message qu'il a reçu de façon à prendre connaissance de son contenu et d'agir en conséquence.

2 - b – Efficacité des représentations

C'est par l'analyse de phénomènes de la vie courante qu'elles ont été élaborées et c'est là qu'elles se révèlent efficaces, qu'elles trouvent leurs applications :

- *« Ces règles ont en général un domaine d'efficacité, de réussite... qui conforte la conception chez l'élève. »* (R.Charnay et M.Mante, 1990-91)
- *« La base structurée de connaissances d'un novice a son efficacité propre... construite en relation avec la classe de situations qu'elle permet d'aborder avec pertinence. Cela la rend relativement solide et la constitue parfois en obstacle (quasi épistémologique) à une progression vers un savoir canonique. »* (S.Johsua, 1985 ; A, p.18) ; plus loin il précise : *« Les problèmes de la physique sont des problèmes rares, ce qui expliquerait que les élèves hésitent à abandonner des représentations si efficaces (dont la pertinence est confirmée à tout moment dans la vie courante) pour quelques cas où elles rencontrent des difficultés. »* (S.Johsua, 1985 ; F, p.3)

Suite à cette lecture, il nous vient une question. En parlant de problèmes rares, veut-il dire :

- qu'ils seraient éloignés de la vie courante, que l'élève serait peu susceptible de les rencontrer, ou bien plutôt
- que les problèmes habituellement posés aux élèves en classe de physique mettent rarement en défaut les représentations des élèves ?

En effet, nous verrons qu'en électricité, certaines représentations permettent une réponse correcte à l'aide d'un raisonnement qui l'est moins, et les questions qui mettraient en défaut les prévisions de l'élève sont exceptionnelles dans l'enseignement actuel.

Toutefois, ces représentations servant de grille de lecture, elles sont parfois utilisées comme hypothèses supplémentaires que l'élève privilégie devant le texte de l'exercice, tel le générateur à débit constant, ce qui induit une démarche d'analyse de la situation fautive, par voie de conséquence des résultats erronés. Ceci peut arriver, malgré une bonne connaissance des propriétés des concepts. On signalera à l'occasion que la résolution proposée par l'élève s'en trouve toujours simplifiée... les représentations permettent une réponse plus rapide, avec moins d'étapes de raisonnement ou de calcul que la démarche scientifique.

En résumé ces représentations des phénomènes ont été construites par l'élève en interaction avec son environnement quotidien où elles se révèlent efficaces. Elles lui permettent de répondre de façon plus simple et

plus rapide, c'est pourquoi il les utilise pour expliquer ou prévoir. Elles lui servent de filtre pour observer et interpréter la réalité extérieure.

3 – Evolution

Ces représentations qui ont révélé leur efficacité au quotidien, on peut les imaginer **tenaces, résistantes** à un enseignement qui se limite à quelques cas particuliers déconnectés de la vie de tous les jours... S.Johsua comme J.L.Closset ont eu l'occasion de constater que pour une importante proportion d'élèves, elles traversent la scolarité, inchangées jusqu'à l'université.

(S.Johsua, 1985 ; A, p. 19) résume des études sur l'apprentissage qui montreraient que certaines représentations résistent énormément aux efforts d'enseignement, qu'elles ne cèdent pas d'un coup la place à des représentations plus évoluées et que, le plus souvent, **plusieurs représentations cohabitent** : « *leur activation dépend de la situation à laquelle le sujet est confronté.* » de même que « *plusieurs modèles cohabitent dans la pensée de l'expert et sont utilisées en fonction de la situation.* » (S.Johsua, 1985 ; F, p.5)

Cette étude nous conduit à penser qu'il est indispensable de les connaître pour comprendre les réactions des élèves en classe, et pour les prendre en compte lorsque nous envisagerons un apprentissage, c'est à dire mettre au cœur de l'activité scolaire ce que les élèves savent déjà avec, comme nous allons le voir, une diversité interindividuelle..

II - Les représentations en électrocinétique

Existence de représentations en électricité

« Nous vivons dans une civilisation de l'électricité. Dès les premières années de sa vie l'enfant est amené à s'interroger sur le monde qui l'entoure et donc aussi sur des phénomènes électriques quotidiens. Les réponses qu'il va construire doivent au moins être suffisantes pour guider ses actions et rendre compte de ses observations. » (J.L.Closset, 1983, p.109 et 1989) :

« L'élève n'a pas attendu de recevoir un enseignement d'électrocinétique pour s'interroger sur l'électricité... son interaction permanente avec le milieu qui l'entoure ne lui laisse pas la possibilité de faire autrement. Il n'a pas non plus attendu l'enseignant pour répondre à ses questions. Il s'est construit une représentation des phénomènes électriques. Cette représentation globale est structurée en des raisonnements qui se sont avérés maintes fois efficaces quant à la résolution de problèmes quotidiens : ils s'en sont trouvés renforcés. Toutefois l'électricité garde pour l'élève certains aspects mystérieux ; celui-ci reste donc demandeur d'informations mais il ne peut recevoir ces informations que dans le cadre du schéma explicatif qu'il s'est déjà construit. »

Ces représentations servent, comme nous aurons l'occasion de le constater, de base active aux raisonnements et conduites des sujets : elles ont été construites « *en fonction de nécessités opératoires et pour y répondre de manière plus simple, plus rapide, plus efficace que le savoir scientifique.* » C'est ce qui les rend si solides et résistantes à l'enseignement.

Les représentations décrites

Nous allons exposer les représentations décrites dans la littérature. Nous les avons toutes rencontrées, dans des proportions variables, à l'entrée en seconde. Nous pourrions ainsi illustrer chacune de citations et expliciter les conséquences au niveau des prévisions concernant le fonctionnement de certains circuits.

A nos questionnaires passés à l'entrée en seconde les élèves qui ont justifié leurs réponses, l'ont fait à l'aide d'une seule notion : les raisonnements sont le plus souvent conduits en terme de courant mais avec des représentations différentes de celui-ci :

1 – La notion de courant

1 - a – Existence de la notion de courant chez l'élève qui entre en seconde

« Les étudiants utilisent le plus souvent pour s'exprimer le terme de « courant » mais il apparaît, que ce courant n'a pas pour eux les mêmes propriétés que l'intensité de courant du physicien » (J.L.Closset, 1983, p.56), et (p.78) « une seule grandeur est utilisée : elle porte souvent le nom de courant, parfois d'électricité. Elle possède certaines propriétés de l'intensité de courant, mais aussi un caractère énergétique prononcé. »

Nous retrouvons dans ces propos une remarque générale concernant les représentations trouvées chez G.Lemeignann et A.Weil-Barais (1993, p. 8) « Ils évoquent des entités non visibles... les entités évoquées sont assez souvent désignées par des termes appartenant au vocabulaire de la physique... Mais quand on y regarde de près, ces termes ne sont pas employés avec les mêmes significations... les propriétés attribuées à ces concepts sont bien souvent différentes de celles retenues par les physiciens... Les propriétés attribuées aux entités peuvent varier selon les circonstances. »

Pour notre part lors du questionnaire passé avant enseignement, lors de nos essais préliminaires, dans deux classes de seconde, soit 69 élèves nous avons recueilli :

- 45 réponses avec le terme de courant, soit 65 % des réponses, (un seul élève utilise « électricité ») dont 8 (soit 18 %) précisant un courant « composé d'électrons », certains ajoutant « c'est un déplacement d'électrons » et même « il y a circulation d'électrons » et 6 (soit 13 %) associant courant et énergie, tels : Emilie « le courant en passant dans la résistance perd de l'énergie » ou Nicolas qui à la question : « c'est quoi le courant pour toi ? » répond « c'est l'énergie...c'est des électrons qui circulent. »
- tandis que 15% ne parlent que « d'électrons qui circulent » les autres ne justifiant pas.

1 - b - Quelles sont les propriétés attribuées au courant par l'élève ?

Dans sa thèse J.L.Closset (1983) observe : « Tout se passe comme si la pile constituait une réserve de quelque chose de matériel (courant, électricité, électrons) qui soit fourni par elle à débit constant au circuit. Ce fluide s'écoule dans le circuit et sert de transport à « l'énergie » ou « la » constitue (électrons consommés). Après avoir rempli sa mission, le courant rentre se réapprovisionner à la pile pour repartir à nouveau (modèle du livreur). »

S.Johsua (1985 ; E, p.2) émet l'hypothèse que « dès les premiers contacts avec l'électrocinétique, l'élève met en place une représentation de base que nous appelons « la métaphore du fluide en mouvement », qu'il explicite ailleurs : « le courant électrique est considéré comme une espèce de fluide enserré dans des tuyaux. Mais la nature de ce fluide est ambiguë, « mixte »... ce fluide comporte un aspect « matériel » et un aspect « énergétique », intimement mêlés dans la pensée de l'élève. L'élève tentera de résoudre les problèmes d'électrocinétique en faisant fonctionner cette métaphore et souvent y parviendra... elle sous-tend diverses représentations. » (S.Johsua, 1986)

De son côté, C. von Rhöneck (1983) a observé que les élèves de 14-15 ans en Allemagne considèrent que le courant est de l'énergie avec ses aspects de stockage, de transport et de transformation où l'aspect de conservation est absent.

Pour notre part nous avons cherché les caractéristiques de ce « fluide », tout d'abord en observant les verbes utilisés pour décrire le rôle des éléments d'un circuit :

- la pile, envoie, fait passer, projette, rejette, produit, délivre, contient ou débite courant, électrons ou énergie. Par exemple « la pile est un réservoir d'énergie » ou « elle contient de l'énergie qu'elle perd petit à petit »
- la résistance ou l'ampoule prend, utilise, stoppe, conserve, retient ou capte..., par exemple : « la lampe reçoit une énergie envoyée par la pile qui lui permet de fonctionner. »

Nous avons aussi demandé « A quoi peux-tu comparer ce qui circule ? » Seulement la moitié des élèves ont répondu, dont :

- | | |
|--------------------|---|
| 38 % eau | « un tuyau d'eau alimenté par un robinet » |
| 12 % sang | « du sang circulant dans les veines » |
| 12 % énergie | « une énergie qui fait allumer » |
| 12 % automobile | « à une voiture car il faut de l'essence pour alimenter le moteur et faire rouler la voiture » |
| et divers autres : | « des boules chargées d'électricité », « des aimants », « un coureur », « une armée de soldats parfaitement rangés, qui va dans le même sens et au même rythme. » |

La moitié des réponses est en lien avec un liquide et l'autre moitié liée à l'énergie ou à un mouvement. La pile semble bien être un réservoir qui envoie quelque chose d'énergétique vers la résistance ou l'ampoule et il y en aurait moins après.

Voici maintenant quelques justifications caractérisant certains aspects de la notion de courant :

FLUIDE ou STATIQUE ?

Lorsque le circuit est ouvert R.J.Ogborn (1992) comme S.Johsua (1985) ont observé que « *les jeunes enfants ont tendance à considérer que le fluide continuera à se déverser au dehors comme l'eau s'écoule d'une canalisation percée* ». Nous avons rencontré Michel, pour qui « *l'interrupteur ouvert est une fuite, les électrons s'échappent* » ce qui illustre la métaphore du fluide en mouvement.

En circuit ouvert, il peut exister « **un courant statique dans les fils** » (J.L.Closset, 1983, p.52 et 171-175). Nous avons rencontré ces explications de :

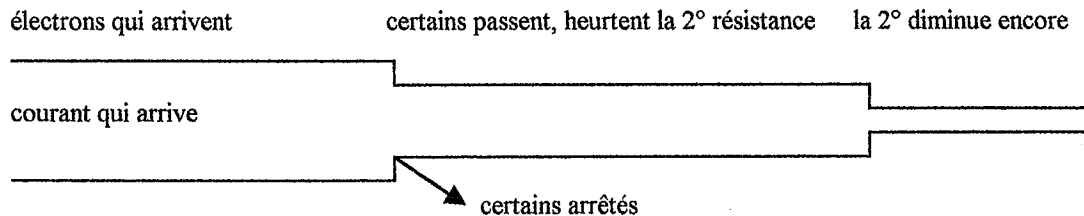
Gaëtan « *il ne circule pas, mais il y en a à cet endroit* »,

Morgan : « *le courant est présent dans le circuit* » sans doute comme l'eau en amont du robinet.

Il y aurait donc un fluide en mouvement en circuit fermé et statique en circuit ouvert, ce qui permettrait de mieux comprendre leur difficulté avec l'interrupteur qui lorsqu'il est ouvert, se comporte comme un robinet fermé... ce fluide peut se trouver retenu, ce qui avait été rencontré par S.Johsua (1985 ; E, p.7) : « *plus la résistance est grande, plus elle retient de courant* » et un élève explique : « *c'est comme un barrage, ça retient le courant* » Jérémy m'a précisé en entretien :

« *une résistance bloque certains électrons, certains restent dans la résistance* »

ce qu'il illustre ainsi :



MATERIEL ou ENERGETIQUE ou énergie substantialisée ?

- **P'aspect matériel**, mêlé d'énergie, se rencontre chez

Saïd « *les électrons sont tellement serrés qu'ils s'échauffent et rougissent* »

Khadija « *l'ampoule utilise du courant pour chauffer et briller* »

« *la résistance enlève du courant, elle en enlève plus car elle est plus grosse.* »

- **P'aspect énergétique** peut conduire aux justifications de :

Jérémy : « *la pile est le fournisseur d'énergie de ce circuit* » ou de

François-Xavier « *une plus grande résistance a besoin de plus d'énergie pour s'alimenter* »

ou à envisager un partage entre deux ampoules A et B montées **en série** :

Saïd « *A transforme la moitié des électrons en chaleur et B transforme l'autre moitié.* »

et donc une seule ampoule éclaire plus que deux en série pour

Jean-Marc « *car elle ne partage pas les électrons avec une ampoule en série* » et pour

Saïd « *elle utilise entièrement les électrons, elle ne les partage pas.* »

Suite à ces observations, nous sommes conduits à partager : « *une conclusion qu'il est possible de tirer est relative à l'utilisation d'un seul concept (nous dirons plutôt notion), pour décrire le circuit électrique. Il joue tout à la fois le rôle d'intensité, de courant et d'énergie, il a certaines propriétés d'un fluide et notamment de s'écouler dans le circuit comme dans des tuyaux ou même des canaux.* » (J.L.Closset, 1989)

Sur ce premier exemple d'une « notion » qui serait commune aux élèves, nous sommes amenés à constater :

- que ce même courant possède non seulement une signification différente en physique et dans le langage de tous les jours, mais aussi la diversité de représentations entre les élèves d'une part et selon que le circuit est ouvert ou fermé d'autre part ;
- qu'en leur demandant des prévisions sur le circuit ouvert, il apparaît l'absence de nécessité de fermeture du circuit pour plus de la moitié des élèves à l'entrée en seconde et que la pile, avec son schéma, ne ferme le circuit que pour un peu plus de la moitié, c'est à dire que

les concepts de circuit et de circulation ne sont pas construits.

Une conséquence logique de ces raisonnements mononotionnels, à base de « *cette notion multiforme qui tient lieu de concept* » est l'absence de pertinence de la différence de potentiel (J.L.Closset, 1989), idée également développée par S.Johsua (1985 ; E, p. 3) : « *l'absence de la notion de potentiel dans la métaphore du fluide* » ; « *la métaphore du fluide s'enrichit avec l'enseignement : elle intègre aisément la notion d'intensité de courant et s'élargit à la notion de résistance (comme obstacle au mouvement) ; on peut même observer une différenciation progressive des notions de courant (matériel) et d'énergie. En revanche la notion de potentiel électrique en un point du circuit paraît quasiment absente : c'est la seule qui n'évoque rien pour 70 % des étudiants en deuxième année universitaire scientifique.* »

2 – Diverses représentations de la notion du « fluide - courant »

2 - a – Le modèle unipolaire ou représentation unifilaire

Cette représentation a été mise en évidence en 1976 par A.Tiberghien et G.Delacôte puis en Nouvelle Zélande par R.J.Ogborn en 1982 chez des enfants de l'école primaire. Pour allumer une ampoule à l'aide d'une pile, un seul fil suffit : le courant s'écoule de la pile vers l'ampoule. Le fil de retour est inutile.

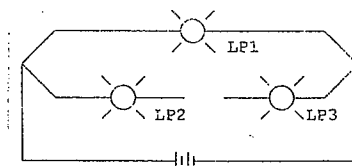
Elle obéit au schéma du raisonnement causal linéaire (causalité simple, F.Halbwachs, 1971) :

« *un agent, la pile agit sur un patient, l'ampoule par un intermédiaire, le fil.* »

ou comme le décrit J.L.Closset (1989) « *la pile (cause) est un contenant, elle possède un contenu, de l'électricité, du courant qui passe par le fil et rejoint l'ampoule où elle permet à celle-ci de s'allumer (effet).* »

S.Johsua (1986) pense que « *cette représentation, présente chez les sujets débutants, disparaît assez vite sous la pression des faits.* » Toutefois des chercheurs ont trouvé cette représentation en lycée, tel D.M.Shipstone : ses travaux de 1985 font état d'une majorité d'élèves de 17-18 ans de différentes écoles de Grande-Bretagne qui raisonnent à partir de ce modèle unipolaire. En Belgique, J.L.Closset (1983, p.178) a observé la persistance de ce modèle chez 18 % des lycéens de 16-19 ans sur un circuit ouvert comportant trois ampoules :

pour ces étudiants les 3 lampes éclairent pareil,
le courant traverse chaque filament.



Ce raisonnement existe-t-il chez les élèves qui arrivaient en seconde après deux années d'enseignement de l'électricité au collège ?

Nous avons observé, lors des essais préliminaires, sur la population de deux classes de seconde, soit 69 élèves que :

- plus de la moitié d'entre eux pense qu'il existe du courant d'un seul côté de l'interrupteur ouvert et ils sont encore 46 % en fin d'année... Ils le justifient ainsi :

Najate « parce qu'il n'y a pas d'obstacle qui nuit à la circulation du courant, c'est un fil tout simplement. »

Saïd « la pile projette du courant, mais qui est arrêté à cause de l'interrupteur. »

Philippe et Sophie « parce que les électrons circulent jusqu'à l'interrupteur puis ne peuvent plus passer. »

- et 15 % d'entre eux imaginent qu'une lampe éclaire (dans un montage en série où l'interrupteur est situé entre les deux ampoules), car :

Khadija « un courant la traverse »

Catarino « il n'y a pas d'interrupteur ouvert avant l'ampoule »

Youssef « l'interrupteur est placé après. »

Ces observations se sont renouvelées les autres années dans les diverses populations testées. On a même obtenu par plusieurs élèves comme proposition de montage d'un système clignotant, deux diodes montées en série, mais tête-bêche, alimentées en « courant alternatif » avec cette explication :

« lors de la première alternance la diode n°1 éclaire, à la deuxième ce sera la diode n°2. »

Remarque : nous pensons que certaines justifications révèlent un raisonnement séquentiel, mais nous en reparlerons plus loin, lorsque nous l'aurons défini.

2 - b – Le modèle des courants antagonistes

D'après l'étude de A.Tiberghien et G.Delacôte (1976), certains enfants reconnaissent l'importance des deux pôles de la pile par lesquels ils font sortir deux courants qui se rejoignent dans l'ampoule où ils sont consommés. Ainsi deux fils sont nécessaires pour conduire chacun les deux électricités distinctes produites par chacune des bornes de la pile vers les deux bornes de la lampe : les deux courants circulent l'un vers l'autre, leur rencontre dans la lampe produit de la lumière. La production d'énergie est étroitement liée à la consommation du courant : rien ne retourne à la pile : « *le modèle unifilaire s'est adapté remarquablement à la nécessité opératoire de deux fils* » (J.L.Closset, 1989).

R.J.Ogborn (1983) a également montré l'utilisation de ce modèle explicatif par les élèves du primaire et D.M.Shipstone (1984) évalue à environ 40 % les élèves de 12 ans qui l'utilisent, ce nombre décroît jusqu'à devenir pratiquement nul à 17 ans...

S.Johsua (1984) en reprenant les travaux de Maury (1981) et Anderson (1984) émet l'hypothèse que ce modèle recouvre plusieurs représentations :

- pour certains élèves **les deux fils transportent le même type de courant**, « *il faut deux fils pour amener plus de courant* ». Cette représentation est en fait une amélioration de la représentation unifilaire, produite par la nécessité de tenir compte de l'expérience, qui impose la présence de deux fils (Maury, 1981) ;
- pour d'autres, il y a bien **deux courants différents qui sortent de la pile pour aller à l'ampoule** « *faire des étincelles* ». Cette représentation pourrait constituer un premier pas vers une tentative de résoudre la contradiction entre les aspects matériel et énergétique du fluide. Ici deux fluides différents sont en mouvement sous l'aspect matériel et de leur rencontre naît un événement nouveau énergétique (Anderson, 1984)

La représentation « à courants antagonistes » peut apparaître **comme intermédiaire entre la représentation unifilaire et les représentations « circulatoires »**, dans le cadre d'une tentative de résorption de la contradiction due au caractère « mixte » de la métaphore du fluide (S.Johsua, 1984).

De leur côté F.Audigier & P.Fillon (1992) nous rappellent, comme A.Benséghir (1989), que ce type d'explication a eu longtemps cours historiquement. Ce n'est que vers 1820 qu'**Ampère** introduisait le concept de courant électrique, sans abandonner l'idée des **courants antagonistes** : « *On est généralement d'accord qu'elle (action électromotrice) continue à porter les deux électricités dans les deux sens où elle les portait auparavant, en sorte qu'il en résulte un double courant, l'un d'électricité positive, l'autre d'électricité négative, partant en sens opposés des points où l'action électromotrice a lieu, et allant se réunir dans la partie du circuit opposée à ces points... C'est cet état de l'électricité dans une série de corps électromoteurs et conducteurs, que je nommerai courant électrique.* »

Il apparaît une similitude entre le raisonnement spontané des élèves et celui des physiciens du début du 19^e siècle.

Nous avons rencontré 9 / 68 élèves de seconde pour imaginer une circulation de part et d'autre d'un interrupteur ouvert : le circuit (annexe V. 7) est composé d'une pile, d'une lampe et de l'interrupteur BC. Voici quelques justifications :

Alice : « *le circuit est fermé entre A et B, il s'ouvre après... le circuit est fermé entre C et D, il s'ouvre après* » (dans la suite du questionnaire son raisonnement est apparemment local).

Xavier « *Le courant part du générateur et va jusqu'à B... le courant part du générateur et va jusqu'à C. Le courant se coupe en deux pour aller dans les deux branches.* »

Hervé explique le rôle de l'interrupteur BC fermé (annexe V. 6) :

« *il y a du courant dans BC car il y a les charges + et - qui se rencontrent.* »

ce qui irait dans le sens d'une autre remarque de F.Audigier & P.Fillon (1992) sur l'origine des courants antagonistes :

« *le vécu de l'élève (observation d'étincelles lors du branchement d'une fiche dans une prise) pourrait renforcer l'induction vers ce modèle.* »

La présence de ces deux modèles, parmi les représentations des élèves à l'entrée en seconde, révèle la nécessité d'introduire un modèle circulaire de courant unique, à l'intérieur d'une boucle fermée, puisque ce modèle n'existe pas chez tous les élèves. Nous allons maintenant observer quels sont les modèles circulatoires présents. Le premier mis en évidence chez les élèves a été le modèle circulaire à épuisement de courant :

2 - c – Le « raisonnement à épuisement de courant » et le raisonnement séquentiel

S.Johsua (1985 ; E, p.6) écrit : « lorsque l'élève rejète les représentations « à courants antagonistes », on voit apparaître une représentation circulatoire, mais avec « **épuisement de courant** ». Le courant ressort de l'ampoule pour retourner vers la pile, mais avec une intensité moindre qu'à son entrée... Dans le cadre de nos hypothèses, cette représentation constituerait une tentative relativement élaborée pour intégrer, en un tout cohérent, les données phénoménologiques (qui poussent à admettre une circulation du fluide et l'aspect « mixte » de la métaphore du fluide. Au lieu de s'épuiser d'un coup, le fluide s'épuise peu à peu. L'aspect « circulation » (matérielle) devient ainsi moins contradictoire avec l'aspect « pertes » (énergétiques).

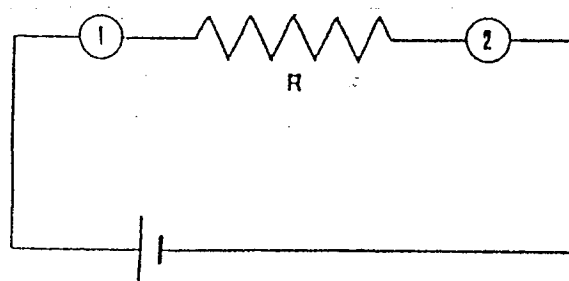
On peut supposer que cette représentation sera particulièrement résistante et qu'elle aura tendance à se manifester chaque fois qu'une situation nouvelle sera abordée par l'élève. »

S.Johsua parle du raisonnement « à épuisement de courant » qui est la forme immédiate la plus primaire du raisonnement séquentiel. Plus tard, en faculté, on rencontre des raisonnements séquentiel sans épuisement.

Définition du raisonnement séquentiel

Ce raisonnement constitue la matière de la thèse de J.L.Closset (1983), dont il résume les grands traits ainsi : « Tout se passe comme si le courant issu de la pile, partait à l'aventure dans le circuit, ne se modifiant que là où il perçoit directement l'obstacle et évidemment sans aucune répercussion de l'aval sur l'amont » (J.L.Closset, 1989) et il poursuit :

« Pour éclairer notre propos, voici la question la plus caractéristique autour de laquelle apparaissent divers raisonnements. Nous avons le circuit ci-dessous :



a) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort, ou moins fort que l'ampoule 2 ?

On augmente la valeur de la résistance :

b) L'ampoule 1 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

c) L'ampoule 2 va-t-elle briller aussi fort, plus fort ou moins fort qu'avant ?

La majorité des élèves interrogés (enseignement secondaire et première année de l'université avant l'enseignement de l'électricité) donnent des réponses qui correspondent au **raisonnement séquentiel** :

a) 1 brille plus fort que 2 b) 1 brille aussi fort qu'avant c) 2 brille moins fort qu'avant.

(Remarque : une autre catégorie de réponses est la réponse « correcte » qui conduit aux prévisions :

a) 1 brille aussi fort que 2 b) 1 brille moins fort qu'avant c) 2 brille moins fort qu'avant.)

« Le débit initial est indépendant du circuit, reste constant quoiqu'il arrive et constitue en quelque sorte une caractéristique de la pile... L'action de la résistance n'a d'influence que sur l'aval du circuit.

Le raisonnement séquentiel dépasse le simple problème de la dualité du « fluide électrique », à la fois matière qui se conserve et énergie qui est consommée. Il trouve une expression plus large liée à une **conception** particulière du circuit doté d'un point de départ privilégié, le **générateur**, et d'une **règle de progression** à partir de celui-ci en direction des divers éléments du circuit. D'un point de vue causal le schéma est unidirectionnel (linéaire comme chez les jeunes enfants) et le circuit n'est pas considéré comme un « système » où la règle du feedback serait obligatoire mais comme un parcours où les actions locales n'ont d'influence que sur l'aval. »

A. B C Sur ce schéma l'élève au raisonnement séquentiel prévoit :



$A \neq C$

Le « courant » partirait du générateur pour subir ensuite des aventures locales, sans rétroaction de l'aval sur l'amont : l'élève raconte l'histoire du courant, puis les aventures de l'électron lors de la traversée de chaque élément du circuit.

Lien entre le raisonnement séquentiel et l'énergie

F.Audigier & P.Fillon rapportent (1992, p.211) que « J.L.Closset et S.Johsua font l'hypothèse que les élèves construisent un modèle de « courant qui s'use » (en fait pour eux, l'intensité du courant diminue) lors du « passage » dans un appareil, pour rendre compte de l'aspect énergétique qu'ils soupçonnent, non pris en compte dans le modèle élémentaire proposé. Les élèves traduisent cela par une perte de charge au lieu d'un échange d'énergie entre le courant et l'appareil (et le milieu environnant). Ils feraient donc un amalgame des aspects matériels et énergétiques du courant. Les élèves sembleraient percevoir de façon spontanée les insuffisances du point de vue énergétique du modèle introduit pour expliquer les phénomènes observés. Cela les entraînerait à envisager une propriété du modèle en contradiction avec l'expérience qu'ils connaissent par ailleurs. »

p.214-215 « Il semble reconnu que l'utilisation du modèle circulatoire de courant avec épuisement progressif serait fortement induite par la métaphore du fluide en mouvement... Cette métaphore ne permettant pas d'expliquer les échanges énergétiques qui ont lieu dans le circuit, cela oblige alors à envisager une perte de fluide pour en rendre compte. La méconnaissance du concept d'énergie serait donc une deuxième cause de la formation spontanée de ce modèle dans les esprits. »

Ces hypothèses seraient validées par « l'étude de D.M.Shipstone qui montre que ce modèle avec épuisement du courant disparaît partiellement dès que l'aspect énergétique est introduit dans le cursus scolaire (vers 16 ans). » (F.Audigier & P.Fillon, 1992, p.211)

Aspect historique : caractéristiques du modèle pour les premiers physiciens

Ces mêmes auteurs, p. 213 citent :

- De la Rive qui écrivait en 1829 : « toutes les fois que le courant électrique passe d'un conducteur dans un autre contigu au premier, il perd dans ce passage une portion de son intensité (au sens actuel) plus ou moins grande selon certaines circonstances... L'effet calorifique est dû à la résistance qu'éprouve l'électricité à passer d'un conducteur à un autre ou d'une molécule à la suivante, qui donne lieu à une diminution locale, ou dans l'intensité ou plutôt dans la vitesse du courant électrique. »
- Pouillet en 1828 : « dans tous les cas , on peut considérer la longueur du circuit de la pile comme une espèce de canal, dans lequel les fluides électriques se meuvent avec plus ou moins de vitesse et de liberté suivant que les conducteurs sont plus ou moins parfaits »
- Péclet en 1832 « la portion de l'électricité qui est arrêtée »

et commentent :

« Les similitudes avec les raisonnements des élèves sont claires : les premiers physiciens étaient aussi influencés par la métaphore du fluide en mouvement... et la méconnaissance du concept d'énergie : ils avaient conscience d'une non conservation lors de la traversée du courant dans un conducteur et l'attribuaient à la variation de l'intensité (non conservation de la charge) ou celle de la vitesse du fluide. » (P.Fillon, 1992, p.214)

Ténacité du raisonnement séquentiel

J.L.Closset (1983), S.Johsua (1983) et D.M.Shipstone (1983) signalent que ce modèle est utilisé de façon prioritaire par les élèves à la fin du secondaire et dans une moindre mesure à l'université (J.L.Closset, 1983, p.172 « plus de 50 % en 1^{er} cycle universitaire ») ; qu'il est extrêmement prégnant dans leur esprit (surtout lorsqu'ils abordent des situations nouvelles). Ce modèle est utilisé par les élèves simultanément avec la connaissance expérimentale de l'unicité de l'intensité en tout point d'un circuit série. Le modèle spontané ou la connaissance expérimentale seront l'un ou l'autre activés selon la situation présentée à l'élève.

Par exemple J.L.Closset (1989) écrit « lorsqu'un enseignement adéquat a installé des mécanismes de production de réponses correctes, le raisonnement « naturel » n'a plus de conséquence, en tout cas à ce niveau de la réponse, mais dès qu'on présente aux étudiants une situation non familière, le raisonnement « naturel » se manifeste à nouveau : il se transfère de préférence au raisonnement appris. »

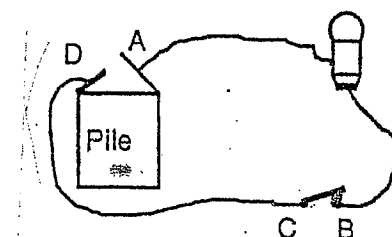
F.Audigier & P.Fillon (p.212-215) font remarquer que les expressions quotidiennes telle que « la consommation d'électricité ou de courant » sont à même de renforcer l'idée de perte de matière, donc de charges dans les appareils et créent des représentations fortement enracinées chez les élèves bien avant l'étude de l'électricité au collège. On pourrait faire une remarque voisine avec la « prise de courant » qui serait plutôt une « prise de tension »...

Quelles représentations en lien avec ce raisonnement avons-nous trouvé ?

Il existe, dans la lecture du circuit, un amont et un aval que le courant découvre au fur et à mesure de sa progression, en conséquence, « l'ordre des éléments dans un circuit série a de l'importance » (J.L.Closset, 1983, p.91) Cette lecture, cohérente avec la métaphore du fluide, les conduit à prévoir :

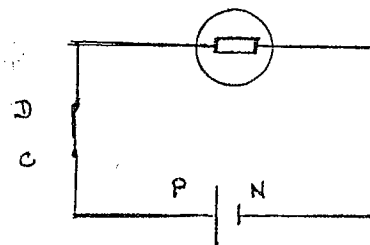
1°- Sur le **circuit simple fermé** (où nous avons trouvé de 50 à 60 % de raisonnement séquentiel à l'entrée en seconde), il arrive que l'affaiblissement du courant après la traversée d'un dipôle soit très fort, comme pour Elodie qui analyse le circuit ci-dessous. Il lui est demandé pour chaque tronçon s'il existe un courant et d'expliquer pourquoi :

*« tronçon AB : oui car il y a l'ampoule qui va recevoir ce courant.
Tronçon CD et BC : non, car rien ne va pouvoir recevoir ce courant :
il est transformé par l'ampoule en lumière et chaleur. »*



Vincent avait les mêmes questions portant sur le schéma :
Il explique :

*« tronçons PC et CD : oui.
Le courant existe puisqu'il fait marcher la lampe
Tronçon DN, non : la lampe doit l'avoir utilisé. »*



2°- Sur le **circuit ouvert** autour de 60 % des élèves imaginent une circulation d'un côté de l'interrupteur ouvert. Cette réponse, à la lecture de leurs justifications, est cohérente avec le raisonnement séquentiel, « qui n'éprouve pas le besoin de fermer le circuit » : elles comportent une analyse spatiale du circuit, le tronçon qui précède l'interrupteur ne serait pas concerné par son ouverture. Voici par exemple l'explication d'Amandine : « le courant part de la pile jusqu'à l'interrupteur. L'interrupteur est ouvert, le courant ne passe pas. » ou de Julien : « jusqu'au niveau de B le courant est présent, mais après, sachant que l'interrupteur est ouvert, le courant ne passe plus. » et pour Mathieu : « l'interrupteur garde l'électricité. »

3°- la place d'un fusible (ou d'une résistance de protection...) ne peut être laissée au hasard, le courant ayant un sens de progression, comme nous l'expliquent :

Stéphanie : « il faut qu'il se trouve avant. » car sinon
Perrine : « il se trouverait après les lampes, donc ne les protégerait pas. »
Vincent : « le courant aurait détérioré les composants avant d'arriver au fusible. »
Florent : « le courant grillera toutes les lampes avant d'arriver au fusible. »

Suivant le même raisonnement ils sont conduits à prévoir l'influence du choix de la place d'un interrupteur, d'une diode ou d'une résistance de protection : toujours avant pour être utile, efficace.

4°- dans un montage en série, ils peuvent prévoir :

- un éclairage différent des lampes (annexe II. 9-10):

« A sera la première ampoule traversée par le courant et elle se servira la première. B n'aura que ce qu'il reste et brillera donc moins que A. »

« les électrons passeront d'abord dans la lampe B. A leur sortie il y en aura moins et ils iront moins vite. »

« A prend ce qu'il lui faut et laisse le reste pour B qui risque d'être en sous tension. »

- l'existence d'une circulation lorsque l'une des deux est grillée ou dévissée (annexe II. 9-10)

Vincent : « pour qu'une seule ampoule éclaire, il faut que la deuxième soit grillée. »

Ana : « une seule lampe éclaire si la première est mal vissée » et « elle éclaire comme si elle était seule car le courant n'a pas été ralenti avant. »

5°- dans un montage avec dérivation ils sont conduits soit :

- à violer la loi des nœuds, par exemple, sur le schéma (a) : ils regardent en amont : le point D comme le point E subissent uniquement l'influence de R₁, donc sont traversés par la même intensité :

$$A = D = E$$

« A et D n'ont pas subi d'autre effet que celui de R₁ et donc sont identiques »

A et E n'ont pas subi d'autre effet que celui de R_1 et donc sont identiques. »
 « il n'y a pas de résistance entre R_1 , R_2 et R_3 . »

Clotilde : « car il n'y a eu aucun frein entre les deux. »

Adeline : « car les résistances sont placées derrière. »

Cécile : « En A, D et E c'est le même courant qui passe puisqu'il vient de R_1 donc ils sont identiques, et en F il est plus petit que tous puisque le courant vient de R_2 . »

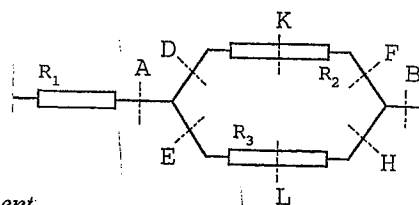


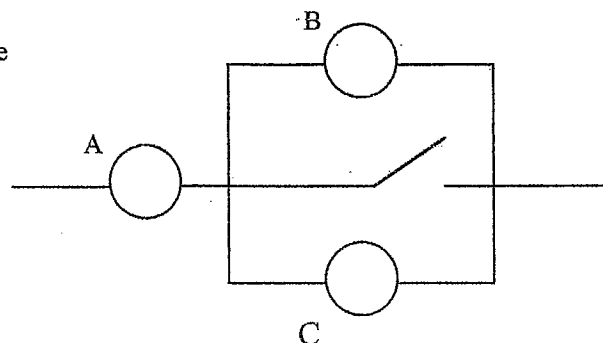
Schéma (a)

- la loi des nœuds admise, le partage sera le plus souvent **égal en aval** (J.L.Closset 1983, p.118-119) : le courant ne sait pas encore « ce qui l'attend » et les lampes brillent moins que si elles étaient seules puisque c'est toujours le même courant qui quitte la pile. Par exemple, sur le schéma ci-contre, que se passe-t-il si nous fermons l'interrupteur :

« la lampe A brillera pareil, les lampes B et C brilleront moins. »

Pourquoi ?

« maintenant le courant se partage en trois. »



- autre raisonnement rencontré :

Emilie, sur le circuit (PN (pile) // FC // ED) prévoit pour les deux lampes FC et ED montées en dérivation une **intensité supérieure** traversant celle située **dans la première branche** :

« le courant passe en premier par CF, donc CF éclaire plus que DE. »

« Le courant passe par CF, ensuite par DE. Il perd de la puissance pour aller en DE. »

En entretien, elle m'a expliqué :

E « C'est comme si on courait ici (PC) et qu'on courait là (CD), il sera **plus fatigué** ici (CD) que là (PC). »

MFM « Il se fatigue en courant ? »

E « Je croyais qu'il en perdait quand il allait plus loin. »

MFM « Il perd quoi ? »

E « De l'énergie. »

- autre prévision, chez un élève qui imagine une circulation en sens contraire : **les lampes en dérivation peuvent éclairer plus que celle de la branche principale**. L'observation d'un montage $A + (B // C)$ conduit à la prévision : $B > A$ et $C > A$ « car elles sont les **premières** à recevoir l'intensité et A éclairera moins car les électrons auront déjà été ralenti. »

N.B. Représentation particulière de la circulation au sein d'une dérivation

Nous avons rencontré chez 10 % des élèves en fin de 3^e et 5 % des élèves entrant en seconde une autre représentation de la **circulation au niveau d'une dérivation**, dont voici quelques justifications sur le schéma (a) :

« L'intensité en F est identique à celle de H, car l'électricité est la même quand elle passe de F à H »

« D et E sont identiques, car ils sont sur le même circuit. F et H comme D et E. »

« F et H : le courant est le même en tout point d'un circuit série. »

« E, L, H se trouvant après R_2 sont tous les trois concernés par le changement. »

Pour ces élèves, le courant semble arriver et repartir par la même branche principale après avoir traversé la « boucle » constituée alors par la dérivation. Cela m'a été confirmé par une collègue qui avait demandé de flécher un circuit identique et qui a obtenu un **fléchage en boucle** dans sa classe de seconde. Voici quelques autres justifications trouvées :

« L'intensité en A est égale à celle de D parce qu'il n'y a pas de résistance entre elles ;

L'intensité de $A > E$ car il y a deux résistances entre elles. »

En nous intéressant à ce raisonnement en boucle, nous avons constaté que cette représentation avait été rencontrée par S.Fauconnet, ce que signale J.L.Closset (1983, pp.76-77). J.L.Closset (1983, p.120) l'avait peut-être lui-même trouvé dans certaines réponses qui sur ce schéma (a) prévoient $D = E$ et $F = H$.

Nous avons cherché à en savoir plus par des entretiens, tel celui de Jonathan dont la réponse était :

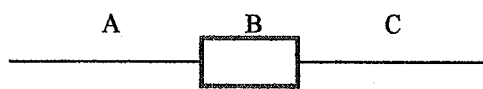
- J : « Car l'intensité passe d'abord par D et finit par E, donc l'intensité baisse. »
- MFM « Les points DEHF sont en série ? »
- J : « Ah non ! Ils sont en dérivation. »
- MFM « Je ne sais pas, tu les as vus en série. »
- J : « Euh... ensemble, ils ne sont pas en série ? Rien que ces points, je veux dire. »
- MFM « Ces points, sans ce qui se passe dans le circuit ? »
- J : « Je veux dire, ces points là DEHF, sans parler du reste, ils sont en série ? »
- MFM « Sans parler du reste, on pourrait dire qu'ils sont en série, mais est-ce que tu penses que le courant qui les parcourt, les parcourt comme il parcourrait une boucle montée en série ? »
- J : « Non, non, non, ils sont en dérivation »
- MFM « Autrement dit, tu as fait un zoom là dessus ? » J : « Ouais ! »
- MFM « Tu l'avais sorti du reste ? » J : « Ouais. »

Il semblerait que pour cet élève son regard se soit arrêté à la boucle, « il est même prêt à laisser le courant faire un retour en arrière », ce regard très local est chez lui mêlé de raisonnement séquentiel.

2 - d - Le raisonnement local

Définition du raisonnement local

Ce raisonnement a été mis en évidence plus tard, car sur les questions habituelles posées aux élèves, qui portent sur l'intensité de part et d'autre d'un dipôle, il leur permet de fournir la réponse correcte. Pour permettre à l'élève de l'exprimer, il faut avoir l'idée de demander ce qui se passe à l'intérieur du dipôle, ce qui est moins usuel... J.L. Closset (Aster n°2) en donne une description : l'élève considère que le courant ne subit de modification que là où intervient un composant, par exemple il diminuerait au sein de la résistance pour ensuite « reprendre son cours normal » : l'action d'un dipôle serait limitée à l'intérieur de celui-ci.



sur ce schéma l'élève au raisonnement local prévoit :

$$A > B$$

$$B < C$$

$$A = C$$

Prévisions découlant d'un regard local

Voici un exemple de justification recueillie en réponse à la question suivante portant sur le montage mixte correspondant au schéma (a) de la page précédente où par un procédé quelconque, on a augmenté la valeur de R2. On demande de comparer l'évolution éventuelle de l'intensité en divers points du circuit.

Voici les justifications des prévisions de Gaëlle :

- « ADF sont identiques car elles ne sont pas sur les résistances, K est plus grand car il est sur R2
 L'intensité en E et H est identique car elles ne sont pas sur la résistance R3
 L'intensité en L est identique car elle se trouve sur R3 et R3 n'a pas été augmentée. »

Nous avons rencontré différentes prévisions dues à une observation du circuit limitée dans l'espace, un regard très « local », comme par exemple la circulation en « boucle » sur le circuit mixte déjà décrite ou encore les justifications suivantes :

1° - considérer que **plus l'agent est près, plus l'effet est grand**. Voici deux exemples de réponses recueillies à des questions portant sur le schéma (a) :

La première question demandait de comparer l'intensité aux points A, B, C :

« l'intensité du courant en A est plus grande car il est plus près des pôles »

« l'intensité en A est la même qu'en C car A et C sont situés au même endroit par rapport à R. »

La deuxième question demandait l'évolution éventuelle lorsque la valeur de R augmente :

« l'intensité de courant en A est plus petite car elle est un peu plus loin de la résistance » ;

« l'intensité de courant en B est plus grande, car B est placé sur la résistance » ;

« l'intensité de courant en A est la même que C, car A et C sont à égale distance de B. »

Une conséquence de ce raisonnement se trouve par exemple pour le choix de la place d'un fusible, telles Fanny ou Anne-Gaëlle qui admettent toutes les places « près du générateur ».

2° - il conduit au **viol de la loi des nœuds**, résumé par

Mathieu : $A = D = E$ $B = F = H$ « ces intensités sont égales car ce sont des fils. »

Mais est-ce un raisonnement local ou une propriété intrinsèque attribuée aux fils ? Ce regard local paraît cohérent avec **certaines propriétés intrinsèques** attribuées aux composants du circuit : si l'action d'un dipôle reste limitée à l'intérieur de celui-ci :

- le **générateur** peut se caractériser par un débit constant, et
 - les **fils** être traversés par un courant constant au cours du temps :
- Virginie : « ces intensités sont égales, car ce sont deux fils conducteurs. »
 Olivier : « car ils restent tous les deux sur le fil » (lorsque R varie)

2 - e – Le raisonnement à courant constant

Définition du raisonnement à courant constant

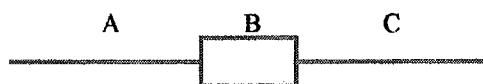
Nous avons évoqué J.L.Closset (1983, p.120) qui avait rencontré sur le schéma (a) des élèves qui prévoyaient $D = E$ et $F = H$ ce qui pourrait être un raisonnement en boucle ou un raisonnement à courant constant. En fonction des justifications, il retient plutôt la seconde hypothèse et écrit : cette « *réponse largement minoritaire qui fait intervenir des justifications qui ne tiennent pas compte d'un rôle éventuel des résistances ou font jouer à l'intensité le rôle d'une grandeur intensive.* »

Voici la définition qu'il donne de ce raisonnement :

« *l'intensité est posée comme une constante non seulement le long du circuit, mais dans le temps et quoiqu'il arrive dans ce circuit. I devient une caractéristique de la pile ou du générateur. Sur ce point il y a compatibilité avec le raisonnement séquentiel.* » (J.L.Closset, 1989)

Il observe qu'avec l'enseignement le raisonnement séquentiel disparaît « *non pas au profit d'un raisonnement correct, mais au profit d'un raisonnement en courant constant beaucoup plus tenace encore* », qui progresse avec le niveau d'enseignement ce qui montre comment l'élève peut transformer l'enseignement reçu sur l'unicité du courant dans un circuit série en un raisonnement en courant constant « *adaptant ainsi le discours de l'enseignant aux moindres frais pour le rendre compatible avec les tendances fortes déjà en place.* »

Remarque : il permet la réponse la plus simple et la plus rapide. Il dispense de tous les concepts du physicien introduits par l'enseignement... et il conduit à la réponse correcte sur les circuits simples non évolutifs. La différence avec le raisonnement correct ne se manifeste que dans l'analyse d'un circuit en évolution :



sur ce schéma l'élève qui raisonne à courant constant prévoit : $A = B = C$ comme avec un raisonnement correct, mais (toujours vrai, $\forall R$)

Lorsque la valeur de R évolue le courant pour lui n'évolue pas, alors que le physicien envisage une évolution : le raisonnement à courant constant prévoit : tandis que le physicien prévoit :

$A = A'$ $B = B'$ $C = C'$ $A \neq A'$ $B \neq B'$ $C \neq C'$

Présence et conséquences du raisonnement à courant constant

Sur le circuit simple ou série, les justifications fournies font référence soit :

- **au générateur**
- Diane : « car l'intensité d'un courant avec le même générateur ne varie pas d'un circuit à un autre. »
- **au montage en série**
- Célia : « l'intensité est la même en tout point d'un circuit série. »
- **rarement au dipôle passif**
- Emmanuelle : « l'intensité dans un circuit série est la même en tout point du circuit qu'il y ait une ou deux résistances. » (lors du passage d'un circuit simple à un circuit série par ajout d'une résistance.)
- **sa présence peut être source d'hésitations**, tel chez cet élève dont une partie de la réponse est rayée :
- « l'intensité délivrée par le générateur est la même
 la résistance étant plus faible, elle laisse passer plus d'intensité (ligne rayée)
 l'intensité est la même partout dans le circuit et le générateur délivre la même intensité. »

Sur un circuit avec une dérivation S.Johsua (1985, E, p.7) avait remarqué que lorsqu'on ajoute une résistance en dérivation, ces élèves prévoient une diminution de l'intensité dans les dérivation puisque la pile délivre un courant constant quelque soit le circuit.

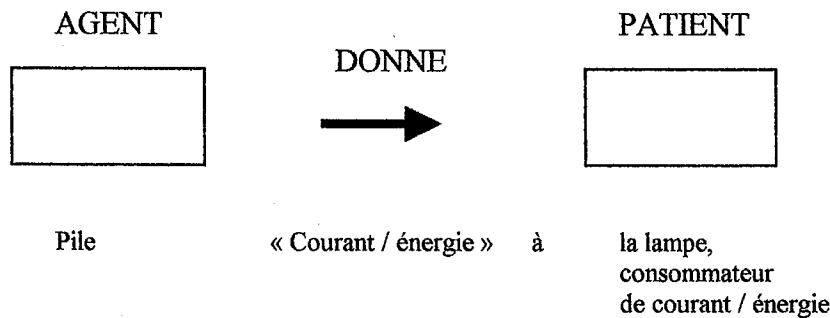
Courant constant et énergie

Sur le circuit simple si le courant est constant à la sortie du générateur il l'est également en traversant le dipôle passif. Par contre, pour certains élèves très sensibilisés aux échanges énergétiques au sein du circuit, sur un circuit comportant plusieurs dipôles passifs ce « courant constant » peut être débité par le générateur comme il peut être reçu par le récepteur :

1° - La représentation par partage des ressources énergétiques

Définition : (J.L.Canal ; 1996, p.7) « Dans cette hypothèse, les élèves ne considèrent que le nombre d'ampoules alimentées par la pile. La pile dissipe une puissance constante. Avec des lampes identiques elle partage son énergie également entre elles indépendamment de la forme du branchement : deux lampes identiques en parallèle ou en série, brillent également mais de façon moindre que si elles étaient seules. »

Dans cette représentation c'est la pile qui impose quelque chose au circuit : « l'agent causal est la pile qui donne quelque chose, énergie ou courant, à une ou plusieurs lampes qui sont les patients, le courant est le médiateur, modèle illustré par le schéma : (D.M.Psillos, 1997)



Conséquence : plus il y a de lampes reliées à une même pile, source de courant constant, moins elles brillent, et ce, quelque soit leur branchement, ce que nous avons observé :

- sur le circuit série :

Karim : « deux lampes en série, ça demande deux fois plus d'énergie. La pile fournit une certaine énergie qui se divise en deux pour les deux lampes... Les deux lampes se partagent les électrons, elles éclairent faiblement. »

Céline : « il y a maintenant deux dipôles et les électrons vont se partager entre les deux dipôles. »
- lorsqu'on ajoute une dérivation :

Guillaume : « une seule lampe éclaire mieux que deux en parallèle parce que toute l'énergie va pour une seule lampe au lieu de deux. »

Charlotte : « car elle reçoit toute l'énergie, tout le courant qui se dégage de la pile. »
- ou si on supprime une dérivation en dévissant l'ampoule L2, d'un circuit avec L1 // L2 // L3

Marie-Emmanuelle : « L1 et L3 éclairent plus fort, elles récupèrent l'énergie de L2. »
- sur le circuit mixte $R_1 + (R_2 // R_3)$:

« l'intensité représentée à travers le courant, traverse trois dipôles, donc l'intensité est divisée par trois. »

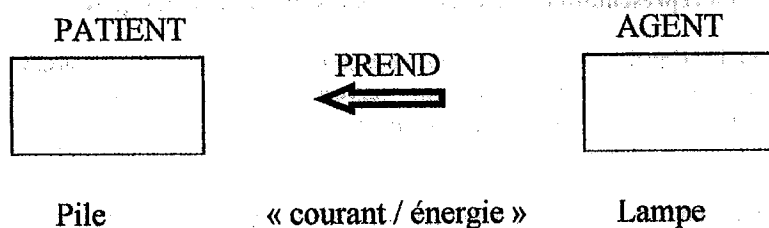
Franck : « ces trois lampes sont identiques, elles se partagent l'intensité du générateur. » (EF // AB + CD)

Mélanie : « Lorsque le courant passe, il distribue la même quantité d'énergie pour chaque ampoule. Chaque ampoule reçoit la même quantité d'intensité car elle réagit comme si elle était seule à être alimentée. S'il y a moins d'ampoules à alimenter il y a plus d'intensité à distribuer à chacune d'elles.. »

2° - La représentation « chacun prend ce qu'il lui faut »

Définition : (J.L.Canal ; 1996, p.7) : « Dans ce modèle, l'idée qui préside à la construction de cette représentation, c'est qu'un récepteur, à puissance nominale donnée, emprunte à la pile ce dont il a besoin quelle que soit la nature du branchement. Dans cette hypothèse, deux ampoules identiques, quel que soit le montage, brillent pareillement comme si elles étaient seules. »

Dans cette représentation, ce sont les lampes qui imposent quelque chose à la pile : « c'est la lampe qui prend, ou absorbe le courant de la pile... La lampe contrôle l'action et reçoit le courant / énergie.... Ces réponses correspondent à une autre représentation du circuit, où la lampe est l'agent et la pile le patient . » (D.M.Psillos, 1997)



Conséquence : des lampes identiques reçoivent et consomment des courants identiques, « comme à la maison. » Amélie prévoit, sur un circuit comportant deux lampes en dérivation auxquelles on ajoute une résistance en série :

« Le générateur produit plus d'énergie et les lampes éclairent pareil. Il faut une plus grande intensité pour que les dipôles puissent fonctionner normalement. »

Mélanie : « Dans ce montage il y a deux résistances au lieu d'une donc plus d'intensité. »

Muriel : « Le générateur doit fournir plus de courant pour deux ampoules que pour une seule. »

Arnold lorsqu'on ajoute une ampoule en dérivation, explique :

« La pile génère l'énergie suffisante pour éclairer les ampoules. Elles sont montées en dérivation, le même nombre d'énergie est fourni aux deux lampes. » (son raisonnement est-il correct ?)

Ces élèves conserveront l'intensité traversant un dipôle passif constante tout au long d'un exercice, quelles que soient les évolutions du circuit.

Ces représentations nient l'influence mutuelle permanente de tous les éléments du circuit. Elles utilisent un raisonnement causal linéaire à une seule variable (courant ou énergie), qui illustrent deux relations complémentaires agent-patient : pour comprendre le circuit électrique l'élève devra abandonner ce raisonnement causal entre objets auxquels ils attribuent des caractéristiques de fonctionnement pour arriver à analyser le circuit comme le résultat d'une interaction mutuelle (D.M.Psillos, 1997).

3 – Caractères généraux de ces représentations

Qu'avons-nous appris de cette étude des représentations rencontrées chez les élèves à l'entrée en classe de seconde ?

3 - a – L'absence des concepts de circuit et de circulation

Ils localisent le lieu de stockage et celui d'utilisation de l'énergie, mais ils ne situent pas les charges que le circuit soit ouvert ou fermé. Nous avons par exemple rencontré Mathieu parce qu'il prévoyait, en circuit ouvert, du courant seulement à l'intérieur des dipôles, ce qu'il nous a confirmé en entretien :

M « Je croyais que les électrons restaient dedans... en réalité il n'y a rien ? »

MF M « Il n'y a plus d'électrons dedans ? »

M « Non. Comme le circuit est ouvert il n'y a rien. »

MF M « Ils sont passés où ? »

M « Dans la pile. »

MF M « Il y a des électrons partout dans le circuit, mais circulent-ils ? »

- M « Non... Ils ne restent pas dans la pile ? »
 MFM « Ils sont sur place, partout dans le circuit, ils attendent l'ordre de mise en marche. »
 M « Ils ne restent pas que dans la pile ? »
 MFM. « Non, même dans les fils. »

Ils ignorent si le courant ce sont des charges fixes ou en mouvement (existence d'un « courant présent mais qui ne circule pas »), quelle est l'origine de leur déplacement, leur mode de circulation et leur participation au transfert de l'énergie.

3 - b – Caractéristiques des modèles circulatoires

Ces différents modèles mononotionnels ou « raisonnements en courant » ont des points communs, dont celui rencontré pratiquement à chaque exemple :

Le générateur à débit constant

« Le courant, et sa conservation, devenant l'aspect dominant du fluide en mouvement, fournira la base de l'analyse des circuits électriques (la tension étant tout à fait secondaire) il deviendra la caractéristique principale de la pile y compris, définie par le courant qu'elle délivre, lequel sera considéré comme une grandeur invariante et fondamentale. » (J.J.Dupin et S.Johsua, 1986)

Cette propriété intrinsèque attribuée au générateur permet le raisonnement local, comme le raisonnement séquentiel ou celui à courant constant. Il permet d'imaginer un courant en amont d'un interrupteur ouvert... Il est à la base de raisonnements de type « causal linéaire », ou agent-patient à une variable : le courant / énergie qui remplace les deux concepts I et U du physicien.

On peut imaginer que cette donnée commune facilite la cohabitation de diverses représentations...

Ces modèles cherchent à rendre compte des échanges énergétiques

La traduction des échanges énergétiques peut se manifester par :

- une relation agent-patient dans laquelle c'est le plus souvent la pile qui impose un débit au circuit (représentation compatible avec celle du générateur à débit constant), mais où il arrive que ce soit la lampe qui réclame quelque chose à la pile ;
- une modification du débit qui se produirait uniquement à l'intérieur du dipôle (raisonnement local), soit à partir de celui-ci (raisonnement séquentiel).

La sensibilité énergétique se traduit aussi par la représentation de la résistance

Ces raisonnements prévoient diverses évolutions du débit lorsque la valeur de la résistance (ou leur nombre, et ce quelque soit leur branchement) varie :

- le raisonnement à courant constant ne lui attribue aucune influence sur le débit à travers l'ensemble du circuit ;
- le raisonnement du physicien le considère, dans une branche, comme un frein à la circulation qui diminue le débit en tout point de la chaîne conductrice ;
- certains élèves, particulièrement parmi ceux au raisonnement local ou séquentiel, l'imaginent autrement, tels :

- Sylvain : « Plus un dipôle est puissant par rapport à un autre, plus il demande d'intensité. »
 Jérôme : « Si R augmente, le récepteur consomme plus, donc il y a plus d'électrons en circulation. »
 Marie : « La plus grande résistance a besoin de plus d'énergie pour s'alimenter. »
 Céline : « R2 a une valeur plus importante que R3 donc il lui faut plus de courant. »
 Nelly : « La résistance est plus grande, elle a besoin de plus de courant. »

Ainsi, il serait d'autant meilleur conducteur qu'il est plus gros : il nécessite ou demande un débit plus fort (remarque : cette prévision peut aussi traduire une représentation « mécanique » rencontrée : le courant passerait plus facilement ce qui permettrait un débit plus fort).

Ces exemples révèlent une méconnaissance de ce composant, illustrée par l'entretien d'élèves à qui je demandais « Quel est le rôle d'une résistance ? »

- Arnaud « éviter le court-circuit, sa valeur ne change rien » réponse partagée avec Aliette, quant à
 François : « je ne sais pas si elle réduit ou augmente l'intensité »

Remarque

« Toutes ces représentations ne sont pas équivalentes du point de vue cognitif. Il y a une progression cognitive entre celles-ci, la représentation à « débit constant » combinée à la notion de conservation du courant apparaissant comme une limite difficilement franchissable par les non spécialistes. » (S.Johsua, 1986)

Cette idée est partagée par J.L.Closset (Reims, 1995) qui précise la hiérarchie cognitive qu'il a observée : « les raisonnements local et séquentiel apparaissent comme plus primitifs que le raisonnement à débit constant. Ce dernier lui-même semble plus simple que le raisonnement systémique correct. » Il lui arrive même de préciser par rapport au nombre de discontinuités du débit :

- le raisonnement local avec deux discontinuités du débit serait moins évolué que
- le raisonnement séquentiel qui en possède une seule, et
- le raisonnement à débit constant, sans discontinuités serait le plus évolué.

L'absence de pertinence du concept de d.d.p.

J.L.Closset (1989) note : « une caractéristique de tous les raisonnements évoqués est qu'ils se font en terme de courant / énergie... et donc la d.d.p. est une grandeur non pertinente. »

S.Johsua (1983) note : « les notions de courant, d'énergie, même peut être de tension apparaissent comme très peu différenciées jusqu'en seconde avant enseignement ». Il remarque ailleurs « si certains sujets considèrent qu'il y a du courant qui circule dans un circuit ouvert, d'autres admettent que le courant est nul dans ces conditions, mais en déduisent que la tension doit alors obligatoirement être aussi nulle. » (S.Johsua, 1983 ; E, p. 29)

Enfin, (S.Johsua, 1986)) « même si les élèves sont capables d'en noter l'existence, la tension est difficilement mise en relation avec les autres grandeurs physiques. Elle n'est jamais opérationnelle : c'est le raisonnement en courant qui domine largement, même quand il conduit à l'échec. »

Nous avons eu l'occasion de le vérifier par des entretiens d'élèves restant « sans réponse », sur des questions portant sur les différents concepts, en fin de 1^o S, tels :

Michael à qui je demandais quelle est la d.d.p. aux bornes d'un fil : « je ne savais plus si c'était 6 ou 0 », ce qui révèle une connaissance de mémoire alliée à un déficit de représentation, confirmé par François à qui « cela n'évoque rien », ou Arnaud à qui je demandais de définir U :

« il est différent de l'intensité, en rapport avec l'intensité et la résistance. »

MFm « Comment vois-tu ce rapport ? »

A « échauffement... tout ça.. »

Elodie à qui je demandais de définir la d.d.p. aux bornes d'un dipôle :

« je ne sais pas la définir »

MFm « est-ce qu'on peut faire varier U aux bornes d'un dipôle ? »

E « avec R car $U = R \times I$. »

Lorsque la représentation commence à se construire, A.Benséghir a constaté que : « l'attention est focalisée sur les pôles du générateur considérés comme des points d'accumulation de charges », et « pour un grand nombre d'élèves la d.d.p. n'est concevable qu'en deux points du circuit ayant un statut particulier au sens où il est permis d'admettre en ces points un « dissymétrie de signe ou de quantité de charges ». La dissymétrie apparaît comme l'effet de l'usure du courant par l'élément du circuit compris entre les points concernés. »

3 - c – Ténacité de ces représentations

Elles constituent un savoir organisé, validé par l'expérience quotidienne, son domaine de pertinence se situant d'abord dans la vie courante. Il arrive qu'elles permettent aussi des prévisions exactes en cours de physique, malgré un raisonnement éloigné de celui du physicien, par exemple :

- le raisonnement « en courant » permet de prévoir si le courant passe,
- la représentation à courant constant est efficace dans l'analyse d'un circuit pris en tant que tel, puisque toutes les grandeurs y sont stationnaires, ce qui représente la majorité des problèmes proposés aux élèves.

Nous avons en effet remarqué que des réponses correctes peuvent masquer des raisonnements qui le sont moins, tel le raisonnement local ou celui à courant constant, qui demandent des questions spécifiques,

inhabituelles dans l'enseignement usuel, pour révéler des prévisions ou des justifications non conformes aux modèles du physicien.

La ténacité des représentations est attestée par les travaux de J.L. Closset :

- au sujet du **raisonnement séquentiel** (1983, p.98) « *il ne disparaît pas, il se transfère* », puis (p.99)
- « *le raisonnement naturel se transfère de préférence au raisonnement appris* »
- le **raisonnement à courant constant** (1995) « *est une difficulté majeure..., le raisonnement systémique correct qui consiste à penser le circuit comme un système où tous les éléments interagissent semble inaccessible, si ce n'est pour quelques uns. Il y a donc là un véritable obstacle épistémologique.* »

comme par ceux de S.Johsua qui écrit (1983, pp. 791-95) :

- « *le courant délivré par une pile est constant, quel que soit le circuit ... l'enseignement général ne modifie en rien cette conception de la 6^e à la seconde.* »
- « *l'enseignement n'a aucune influence sur le modèle à courant constant, qui n'est jamais dépassé, même aux plus hauts niveaux universitaires, par une majorité de sujets.* »

G.Robardet (1990, pp. 17-28) écrit : « *on ignore le plus souvent les représentations initiales des élèves, qui les conservera intactes par la suite (ce, d'autant plus que les expériences qu'on lui présente sont déconnectées du réel.)* » Nous avons observé que l'enseignement usuel les influence peu, puisque les chercheurs les retrouvent en premier cycle universitaire. Par exemple J.L.Closset (1983, p.172) parle de plus de 50 % des élèves en début de premier cycle universitaire qui prévoient un partage égal à l'entrée d'un nœud et différent à la sortie (raisonnement séquentiel), ou S.Johsua (1983, partie E) qui analyse l'effet de l'enseignement sur les différents points évoqués plus haut, et en trouve peu. Il est vrai que l'enseignement usuel :

- n'aborde jamais certains éléments du circuit, tels l'interrupteur ou les fils. Le circuit n'est pas traité dans son intégralité, et certains aspects passés sous silence comme le circuit ouvert, ou la fermeture du circuit au niveau de la pile. A l'élève qui est sensible aux échanges énergétiques, on ne lui dit jamais que si le courant est conservé, de l'énergie est consommée...
- adopte une démarche qui ne tient pas compte des connaissances actuelles sur l'apprentissage.

Nous sommes pour notre part allés observer ce qui se passait pour une notion non enseignée, à savoir le circuit ouvert. Nous avons trouvé les mêmes réponses à l'entrée en seconde, en fin de seconde ou de première que J.L.Closset ou S.Johsua à l'université : plus de 50 % des élèves imaginent du courant en amont de l'ouverture d'un circuit.

Nous avons également été témoin, en entretien, combien l'esprit évolue lentement, par étapes :

- MFM « *On place une résistance dans un circuit, est-ce que cela change quelque chose ?* »
F : « *plus R est grande, plus l'intensité est importante car* $U = R \times I$ »
- MFM « *le texte précise que U reste constante, alors ?* »
F : « *si R augmente, alors* *I reste constant.* »
- MFM « *U (constant) = R (plus grand) x I (constant) est-ce possible ?*
R (plus grand) x I (constant) alors U sera... »
F « *plus grand* »
- MFM « *on reprend, on veut que U reste constant, tandis que R augmente alors I ?* »
F « *si R augmente alors I diminue.* »
- MFM « *oui, une résistance comme son nom l'indique résiste, freine Peux-tu définir I ?* »
F « *c'est un courant, non ?* »
- MFM « *I représente quoi par rapport au courant ?* »
F « *.* »
- MFM « *peux-tu définir U ?* »
F « *cela ne lui évoque rien* »

Cette ténacité se manifeste également par le fait que plusieurs représentations cohabitent chez un même sujet, y compris chez « l'expert » : selon la situation proposée, l'une ou l'autre se trouvera activée.

Cette analyse donne une idée des représentations présentes chez les élèves qui ont participé à l'apprentissage avec la séquence et des difficultés prévisibles de par leur diversité et leur ténacité.

C - Analyse épistémologique des contenus à enseigner

Les recherches sur les représentations des élèves montrent que la physique est « *une discipline difficile d'accès* » (S.Johsua ; 1983, p.16), et que l'électricité est « *difficile à apprendre* » (A.Tiberghien, D.Psillos, P.Koumaras ; 1995, p.423), ce qui se trouve confirmé par les travaux de S.Johsua (1986), J.L.Closset (1984) ou D.M.Shipstone (1985) qui ont retrouvé les mêmes raisonnements du collège à l'université, et D.M.Shipstone & al. (1988) qui ont mis en évidence le même phénomène dans les autres pays européens testés. Ils ont montré la résistance des conceptions due, entre autres raisons, à leur efficacité éprouvée au quotidien (déjà observée par Platon, dans cet extrait de Ménon : « *En vue de nos actions, l'opinion droite n'est en rien plus mauvaise que le savoir, ni d'une moindre utilité* »).

On en vient à rechercher comment s'élabore un changement conceptuel en s'intéressant à la nature de la connaissance scientifique, comment elle se construit chez un individu et comment l'y aider, c'est à dire quelles sont aujourd'hui les hypothèses sur l'apprentissage afin d'élaborer une connaissance à transmettre recevable dans le cadre des représentations présentes et de la causalité accessible aux élèves.

I – Nature de la connaissance scientifique

1 – Différentes façons de penser la physique

1 - a – Evolution historique du dogme à l'hypothèse

Pour les « anciens » tel Platon, la science, fondée sur le raisonnement de la cause, permet d'accéder à la Vérité, elle apporte la certitude. Dans cette lignée, plus près de nous, Descartes a écrit « Des règles pour la direction de l'esprit » qui sont un exposé sur les moyens pour atteindre la **certitude de la connaissance** : « *règles certaines et faciles dont l'exacte observation fera qu'... il parviendra par un accroissement graduel et continu de science, à la véritable connaissance de ce qu'il sera capable de connaître* ». Au dix neuvième siècle, les physiciens croyaient encore, avec quelque raison, « à l'idée d'un **progrès scientifique continu**. Depuis la Renaissance les principes fondamentaux avaient été petit à petit établis. Le travail des savants consistait à les compléter, les étoffer, les illustrer, ... au dogmatisme néo-aristotélécien avait succédé un **dogmatisme scientiste**. » (J.Rosmorduc ; 1979, p.155) ce qu'explique P.Valéry (dans J.Rosmorduc ; 1979, p.87) :

« *Les corps solides étaient encore solides. Les corps opaques étaient encore tout opaques. Newton et Galilée régnaient en paix : la physique était heureuse et ses repères absolus. Le Temps coulait des jours paisibles : toutes les heures étaient égales devant l'Univers. L'Espace jouissait d'être infini, homogène et parfaitement indifférent à tout ce qui se passait dans son auguste sein... La Matière se sentait de justes et bonnes lois, et ne soupçonnait pas le moins du monde qu'elle put en changer dans l'extrême petitesse jusqu'à perdre, dans cet abîme de division, la notion même de loi.* »

Mais, dès la fin du XIX^e siècle plusieurs observations ou expériences ont remis en cause le paradigme newtonien d'espace et de temps absolu... que la théorie de la relativité d'A.Einstein permettra, en changeant de paradigme, d'interpréter. Aussi aujourd'hui est-il communément admis, qu' : « *il n'y a pas de vérité absolue... pour tous les phénomènes naturels, les principes desquels nous partons, de même que les conclusions auxquelles nous arrivons, ne représentent que des vérités relatives* » (C.Bernard, dans J.Rosmorduc ; 1979, p.43), ce qu'entre temps A.Einstein exprimait en comparant le physicien à un horloger :

« *Les concepts physiques sont des créations libres de l'esprit humain et ne sont pas comme on pourrait le croire uniquement déterminées par le monde extérieur. Dans l'effort que nous faisons pour comprendre le monde, nous ressemblons quelque peu à l'homme qui essaie de comprendre le mécanisme d'une montre fermée. Il voit le cadran et les aiguilles en mouvement. Il entend le tic-tac, mais il n'a aucun moyen d'ouvrir le boîtier. S'il est ingénieux il pourra se former quelque image du mécanisme, qu'il rendra responsable de tout ce qu'il observe, mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations. Il ne sera jamais en état de comparer son image avec le mécanisme réel, et il ne peut même pas se représenter la possibilité ou la signification d'une telle comparaison.* »

Dans ces conditions « *les concepts et les théories doivent être librement inventés. Il n'y a pas de pont logique entre les phénomènes et les principes chargés de les expliquer.* » (A.Einstein, 1968)

A l'idée d'une science oeuvre de découverte, à la recherche de la Vérité se substitue l'idée d'une science oeuvre d'invention. Pour P.Langevin « *la tâche de la science, commencée depuis des millénaires, est de poursuivre une adaptation de plus en plus précise de notre esprit à la réalité, de construire une représentation*

de plus en plus adéquate du monde qui nous entoure et auquel nous appartenons, pour le comprendre d'abord, puis pour passer de la compréhension à la prévision et ensuite à l'action. » (J.Rosmorduc, 1979)

K.Popper (1973) précise que ces constructions de l'esprit humain conservent toujours **un caractère hypothétique et révisable** « *les théories scientifiques, si elles ne sont pas falsifiées, restent toujours des hypothèses ou des conjectures* ». Si Aristote n'expérimentait pas, depuis Galilée les physiciens expérimentent. Pour K.Popper (1973), si les résultats d'une expérience ont été prédits par une théorie cela ne dit rien au sujet de la « vérité » de cette théorie : elle permet juste de tenir cette théorie pour non réfutée. Par contre, si les résultats expérimentaux diffèrent, ils doivent conduire à préciser le domaine de validité de la théorie : « *la science ne dit pas le vrai ; elle sait ce qui est faux.* » (S.Johsua et J.J.Dupin, 1993)

1 - b – Que font vraiment les physiciens ?

« *Les sciences, chacune dans son domaine propre, tentent de déterminer les caractéristiques du phénomène qu'elles étudient, d'en analyser le mécanisme, d'en approcher les lois. Pour comprendre d'abord, pour agir ensuite sur une réalité, qui peut être strictement matérielle s'il s'agit de certains phénomènes physiques...* » Cette définition donnée par J.Rosmorduc (1979, p.10) ne permet pas de distinguer l'approche du monde qui l'environne par l'homme et par le physicien, pourtant il semblerait que les caractéristiques de leurs représentations du monde s'opposent, comme l'illustrent ces descriptions :

- des représentations personnelles :
 - o statut de l'évidence, non ouvert à la réfutation, formulées en termes flous, constituées de connaissances éparses et sans liens, « *un savoir en miettes* » (G.Bachelard, 1938) ;
 - o non conscientes et implicites, individuelles, elles vont de soi sur une situation particulière, centrées sur les objets, leurs propriétés et leurs fonctions (G.Lemeignan & A.Weil-Barais ; 1992, pp.8-9) ;
 - o qui constituent un savoir qui « *n'est pas questionnable par essence, n'est que partiellement structuré et partiellement cohérent.* » (J.L.Closset ; 1983, pp.8-9)
- et celles de la connaissance scientifique :
 - o « *consciente, explicite, partagée par une communauté, générale (domaine de validité spécifié), flexible, centrée sur les systèmes et leurs descripteurs* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993) ou
 - o « *totalement explicite, questionnable, structurée et cohérente.* » (J.L.Closset ; 1983, p.9)

Quelle différence existe-t-il entre l'élaboration de la connaissance commune et celle de la connaissance scientifique ? Quelle démarche particulière conduit l'esprit humain vers la construction d'un savoir scientifique ? P.Jensen (1997, p. 1609-18) pose la question « *Que font vraiment les physiciens ?* » et fournit quelques éléments de réponse, en cohérence avec certains travaux :

Au départ se trouve la physique du sens commun avec Aristote : il observe, compare, essaie d'expliquer, procède beaucoup par analogie et par induction pour établir une théorie générale qu'il ne vérifie ensuite plus, ne confronte pas à de nouveaux faits. Pour Aristote les éléments de départ, les mécanismes simples sont ceux que nous pouvons observer dans notre vie de tous les jours.. mais nous pouvons lui objecter avec P.Jensen (1997) que « *la découverte passive des lois physiques par simple observation est invraisemblable* » (p.1610) et « *le mythe selon lequel les physiciens observent la nature pour en déduire ses lois ne tient pas.* » (p. 1611)

Pour A.Einstein « *la science n'est pas une collection de lois... elle est une création de l'esprit humain au moyen d'idées, et de concepts librement inventés. Les théories physiques essaient de former une image de la réalité et de la rattacher au vaste monde des impressions sensibles.... Sans la croyance qu'il est possible de saisir la réalité avec nos constructions théoriques, sans la croyance en l'harmonie interne du monde, il ne pourrait pas y avoir de science* » (A.Einstein ; 1981, pp. 274-76).

Ainsi « *les choses nous sont données à interpréter.* » (G.Lemeignann & A.Weil-Barais ; 1993, p.17)
Comment ?

« *Le physicien introduit des présupposés, une vision du monde préalable à toute analyse « impartiale »... La physique suppose que tout est composé de mécanismes simples et analyse le monde avec ces lunettes là.* » ... il existe « *une différence entre le monde réel et le monde inventé par les physiciens.* » Par exemple, pour Galilée les mouvements simples sont ceux qui peuvent s'articuler mathématiquement. « *L'idée fondamentale de Galilée, qui est le point de départ de toute la physique moderne, a été de décider que la nature obéit à des lois simples qu'il faut articuler avec les mathématiques, ce qui n'est nullement évident d'après notre expérience quotidienne... Cette idée que le monde est composé de mécanismes simples qui obéissent aux*

mathématiques ne permet pas vraiment de le comprendre, mais il permet à coup sûr de le manipuler. » (P.Jensen, 1997 ; p.1609-11)

Ainsi en articulant des éléments simples avec les mathématiques, les **physiciens construisent un monde idéal**, une sorte de scène de théâtre, aussi dépouillée que possible, « *où l'on cache beaucoup de phénomènes parasites sous le tapis* » (P.Jensen ; 1997, p.1615), qui reproduit certains phénomènes du monde réel.... Ces éléments de construction (nommés concepts), ne sont pas des propriétés intrinsèques de l'objet, n'existent pas réellement : ils sont créés de toutes pièces. (p.1611) ce qu'exprime L.Viennot (1996, p.26) par « *les sciences physiques décrivent les phénomènes en termes de grandeurs physiques* » et (p.10) « *les grandeurs physiques n'existent pas en elles-mêmes. On les définit et on les mesure* ». « *Dans ce processus d'abstraction des concepts se construisent tandis que les notions familières perdent leur utilité. Mais cette démarche est peu naturelle, toute l'histoire des sciences en témoigne.* » (L.Viennot ; 1996, p. 26)

On peut ajouter que les concepts ont été choisis pour leur pertinence et leur puissance qui se manifeste notamment par certaines propriétés d'invariance.

En résumé le physicien se livre à « *une activité en rupture avec le sens commun* » (S.Johsua ; 1983, p.69) et Y.Quéré (1997) d'ajouter « *la science ne serait rien sans les objets du savoir accumulés depuis le fond des temps sur l'étagère de la grande bibliothèque universelle... nous devons apprendre à nos élèves à s'approprier ces objets, à les connaître et à savoir les manipuler. Il faut connaître les effets pour comprendre les lois, connaître les lois pour comprendre les théories... Les grands principes ne tombent pas du ciel, ils émergent peu à peu à partir d'un faisceau de faits, le plus souvent expérimentaux et s'imposent si on veut donner cohérence à ceux-ci.* »

1 - c – Quel intérêt pour l'apprentissage ?

Alors que le raisonnement usuel met volontiers en jeu des histoires d'objets et des caractéristiques simples d'objets, les théories physiques ont du définir des grandeurs physiques et élaborer toute une série de concepts. De même, nous venons d'observer un profond changement de la nature des connaissances scientifiques qui sont passées du statut de dogme à celui d'objet construit falsifiable. On peut se demander si ces évolutions, pour ne pas dire révolutions dans la démarche de l'homme d'une part, et de la science d'autre part, ne correspondent pas à un autre mode de construction chez un individu, et par là à un apprentissage différent.

Cette évolution est analysée par A.Laugier & A.Dumon (1998) qui posent la question : « *Quelle épistémologie pour quelle démarche ?* », ainsi que par A.Dumas-Carré et M.Goffard (1997, p.51) qui étudient un « *changement de point de vue sur les connaissances et l'apprentissage* » :

Point de vue « coutumier »

Il a été relevé par S.Johsua & J.J.Dupin (1993 ; pp.162-163) chez des élèves et par A.Dumas-Carré et M.Goffard (1997, pp.51-52) chez des enseignants qui le décrivent ainsi :

- « *la manière de penser la physique... est la suivante : il s'agit d'un corpus de connaissances établies, reconnues, inquestionnables. Les modèles... sont le plus souvent considérés non comme des modèles mais comme la réalité, la vérité.... Les concepts sont présentés comme s'ils avaient toujours existé.* » (p.51)
- « *l'enseignant voit le réel à travers les modèles qu'il a construits... Le professeur présente les modèles comme s'ils avaient toujours existé. Il ne distingue pas les modèles des faits ou des phénomènes.* » (p.52)
- « *la pédagogie est essentiellement axée sur l'apport d'informations : les heures de cours consacrées à un exposé sur les phénomènes et les concepts fixés par les programmes et certaines consacrées à des corrigés d'exercices d'application.* » (p.51)

Il apparaît que « *la distance entre le bon sens et ce qu'on enseigne est habituellement négligée... la croyance en l'évidence de la physique qui découlerait simplement d'une observation attentive de la nature y est pour beaucoup.* » (P.Jensen ; 1997, p.1617)) Dans ce contexte « *il suffirait, pour que les élèves apprennent, de leur exposer clairement les contenus, c'est à dire les relations de définition des concepts, les procédures d'application des lois dans lesquelles ces derniers interviennent, puis de leur faire utiliser dans des situations un peu nouvelles.* » (A.Dumas-Carré & M.Goffard ; 1997, p.51) C'est considérer l'enfant comme « *une cruche vide qu'il suffit de remplir* » ou comme « *une cire molle qu'il suffit d'imprimer.* » (A.Laugier & A.Dumon ; 1998, p.1268)

L'enseignement scientifique a souvent recours à l'expérimental, employé avec les mêmes postulats concernant la science : « *la physique, science expérimentale par excellence, doit voir son enseignement s'appuyer sans cesse sur l'observation des faits et des phénomènes, on doit privilégier la méthode inductive et le recours systématique à l'expérience* » (rapport Bergé, 1989). Ainsi l'observation des phénomènes permettrait de passer du monde perçu au monde pensé, qui induirait l'hypothèse, ce qui permettrait de valider des connaissances. (A.Laugier & A.Dumon ; 1998, p.1268)

Si tel est le savoir des maîtres, on ne peut guère espérer qu'ils transmettent autre chose à l'élève... d'après F.Halbwachs (1975). Ces modes d'enseignement théorique comme expérimental sont-ils satisfaisants aujourd'hui ?

« Notre point de vue »

Cette conception de l'enseignement et de l'apprentissage découlait de la manière de penser la physique qui était encore celle du XIX^e siècle. Nous avons décrit son évolution. Pour nous la nature de la connaissance scientifique apparaît toute autre : « *la physique est une science qui se construit journalièrement, qui avance, qui vit. Il ne s'agit pas d'un corpus fermé, mort, inquestionnable... C'est cette image dynamique que nous voulons transmettre. Penser en scientifique, c'est penser en termes d'hypothèses réfutables à tout moment et qui auront besoin d'être validées. C'est aussi élaborer des modèles... limités, qui seront affinés peu à peu...* »

D'autre part, comme le soulignent S.Johsua et J.J.Dupin (1993, pp.162-163), si c'est la réalité que la science étudie, quelle possibilité de comprendre les concepts en termes autres que substantialistes, leurs propriétés autres que les propriétés intrinsèques de corps ... ?

Aussi la démarche d'apprentissage ne peut plus être celle décrite comme « coutumière ». Notre conception de l'apprentissage se doit d'être cohérente avec la représentation actuelle de la science. Elle devra aussi tenir compte des travaux complémentaires de :

- G.Bachelard (1938) « *toute connaissance est une réponse à une question* » ;
- T.S.Khun (1983) qui a montré la difficulté de changer de paradigme : les élèves ne changeront pas d'avis après une expérience qui contredit leurs prévisions ;
- K.Popper (1985) : une théorie conserve un caractère hypothétique et révisable ;
- et J. Piaget (1976) : l'enfant construit sa pensée à partir de l'action et dans l'interaction avec son environnement, d'où l'importance de l'activité de l'élève dans la construction de son savoir.

L'élève doit agir pour apprendre, ce qui situe l'élève au centre du processus d'apprentissage.

Nous partageons avec A.Dumas-Carré & M.Goffard (1997, p.53) l'idée que « *pour qu'un élève puisse apprendre, il ne suffit pas de lui exposer les connaissances de la physique tout élaborées, de lui demander de les mémoriser puis de les mobiliser pour les appliquer* », sans oublier que l'élève est incapable de construire seul les concepts (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1992), on ne peut donc pas non plus lui demander de tout redécouvrir... et, de plus « *si on se rappelle que tous les concepts de la physique ont été laborieusement inventés par des hommes au bout de longs efforts, on aurait moins de mal à comprendre qu'ils sont très difficiles à admettre par les étudiants.* » P.Jensen (1997)

Quelles activités intellectuelles favoriser pour la construction d'une connaissance scientifique ?

Pour que l'élève puisse apprendre (A.Dumas-Carré & M.Goffard ; 1997, p.53) il faut le mettre en situation de construire et de structurer lui-même ses connaissances, au travers d'activités spécifiques choisies, organisées et gérées par le professeur. L'élève apprend avec les connaissances qu'il possède déjà. Dans ce contexte, A.Laugier et A.Dumon (1998) proposent pour « *prendre le temps du détour pour construire le problème* » de :

- **favoriser le questionnement :**
 - o « *faire des sciences, c'est se poser des questions... l'activité scientifique ne se réduit pas à résoudre des problèmes, elle consiste d'abord à les poser. Le problème qui pourra faire l'objet d'une expérimentation doit être construit avec la classe.* »
 - « *Cette phase de construction du problème souvent escamotée en classe paraît indispensable pour permettre à l'élève de s'investir effectivement dans sa résolution* » (p.1268)
 - o faire exprimer les représentations par des prévisions sur un phénomène ancré dans le quotidien avant l'expérimentation : « *l'enseignement doit placer l'élève dans des situations où devant faire des prévisions sur le résultat d'une expérience, il va s'appuyer*

sur ses représentations et les confronter avec celles de ses camarades. L'expérience est là, non pour montrer la vérité » (p.1273) mais pour permettre le questionnement ;

- **développer l'aptitude à voir** autre chose que ce que l'on a l'habitude de voir, apprendre à changer son regard : des aptitudes où se mêlent la curiosité et le goût de la recherche, l'esprit d'initiative et d'invention, le souci de coopération ... (p.1271)

Cette démarche permet à l'enseignant de mettre en évidence qu'il existe plusieurs représentations parmi les élèves, et que ces différents modèles spontanés sont insuffisants pour expliquer les faits expérimentaux, même si on ne voit que ce que l'on est préparé à voir, si on ne lit pas sans préjugés. L'enseignant n'est plus un simple instructeur qui livre des résultats (nous préciserons son rôle un peu plus loin).

2 – Le modèle

Selon J.Piaget (1976) « *la connaissance, c'est tout le contraire d'une copie de la réalité, c'est une reconstitution de la réalité par les concepts du sujet qui, par efforts progressifs, se rapproche de l'objet, mais sans l'atteindre jamais en lui-même.* » En effet (G.Lemeignan & A.Weil-Barais ; 1992, p.16-18) la science n'est pas une collection de lois, de faits non reliés entre eux ; elle est une création de l'esprit humain au moyen d'idées et de concepts librement inventés. Les théories physiques essaient de former une image de la réalité. Comment ? H.Gié (1997) répond : « *la démarche scientifique repose sur un mécanisme dialectique de va et vient entre modélisation et confrontation expérimentale.* » On y trouve donc l'activité de construction de modèle, activité intellectuelle nécessaire pour résoudre un problème ou répondre à une question.

En quoi consistent cette activité et ces constructions de l'esprit ?

2 - a – Définitions

« *Un concept se définit par un ensemble de propriétés. Son domaine de définition, et le domaine de validité de ses propriétés sont clairement limités.*

Les différents concepts du champ de la physique envisagé s'articulent entre eux pour constituer l'expression d'une théorie.

Le concept est l'unité de base de la connaissance scientifique... La plupart des concepts utilisés en physique sont des concepts quantitatifs auxquels correspondent des grandeurs mesurables. » (J.L.Closset; 1983, p.10)

G.Vergnaud (1990) propose une « *définition pragmatique d'un concept comme un triplet de trois ensembles :*

- *l'ensemble des situations qui donnent sens au concept (la référence)*
- *l'ensemble des invariants sur lesquels reposent l'opérationnalité des schèmes (le signifié)*
- *l'ensemble des formes langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept : ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant).* »

S.Johsua & J.J.Dupin (1993, p.15) « *l'espace où la science utilise des modèles s'étend de la représentation presque figurative à celui de la mise en relation de concepts d'un haut degré d'abstraction.* » :

- par exemple M.Barral et N.Jourdain (1997, p. 648) définissent un modèle comme étant « *une simplification de la réalité destinée à comprendre cette réalité : elle permet de bâtir une théorie pour expliquer de façon cohérente divers phénomènes constatés expérimentalement* » et donnent son rôle : « *il doit permettre de prévoir et d'interpréter des faits et des phénomènes d'une situation physique réelle* » ;
- alors que S.Johsua (1985, partie B p. 58) écrit « *on utilisera le terme modèle pour désigner un corps cohérent de relations entre concepts dans un domaine de la physique : le modèle classique de l'électrocinétique* » et précise (p. 59) « *un modèle est toujours postulé, jamais établi expérimentalement.* »

Le modèle, dans la définition de Halbwachs (1974), relève entièrement du domaine théorique, où une représentation du domaine cible est construite, contenant des notions de base définies les unes par rapport aux autres au moyen d'énoncés qui introduisent entre elles des relations. Le rapport à la situation cible est du domaine de l'expérimentation, suite d'actions sur le domaine cible. La validité du modèle étant fournie par la comparaison des valeurs calculées dans le modèle et des valeurs correspondantes dans le domaine cible.

La **théorie** regroupe une famille de modèles, portant sur une vaste région du savoir, reliés par des relations logiques qui assurent une certaine cohérence à l'ensemble. (S.Johsua J.J.Dupin ; 1993, p.17)

Le processus de modélisation, d'après Y.Chevallard (1989), comporte trois étapes :

« 1 – on définit le système que l'on entend étudier, en en précisant les aspects pertinents par rapport à l'étude que l'on veut faire de ce système, soit l'ensemble des variables par lesquelles on le découpe dans le domaine de réalité où il nous apparaît... »

2 – on construit alors le modèle à proprement parler en établissant un certain nombre de relations ... entre les variables prises en compte dans la première étape, le modèle du système à étudier étant l'ensemble de ces relations.

3 – on « travaille » le modèle ainsi obtenu, dans le but de produire des connaissances relatives au système étudié, connaissances qui prennent la forme de nouvelles relations entre les variables du système. »

2 - b – De la réalité aux concepts ou « le problème de la nature des objets en physique »

Des définitions qui précèdent on retiendra la distance entre les outils que se construit le physicien « *outil cognitif de l'homme dans son effort pour se rendre le monde intelligible* » (L.Gomatos, 1996), et la réalité, distance exprimée également par :

- P.Léna (1999, p.15) « *la science n'existe pas sans appropriation... de concepts abstraits, laborieusement dégagés du sens commun et de ses illusions.* »
- C.A.Risset (1996, pp.5-17) « *la puissance scientifique apparaît liée à l'utilisation des modèles... On remplace le réel par un réel fictif, qui pour imaginaire qu'il soit, se situe résolument dans la réalité... par une démarche de réduction, inhérente à tout essai d'organisation. Pour pouvoir atteindre à une certaine puissance, on est conduit à simplifier et à abandonner la richesse du matériel qu'on veut maîtriser.* »
- C.Ruhla (1996, pp.21-23) « *aucune loi, aucune théorie ne peut prétendre représenter la réalité d'un phénomène dans son intégralité ... Le modèle est l'image que se fait le physicien de la nature à travers le fonctionnement de sa matière grise.* »

Ainsi le physicien part de phénomènes « réels », mais ce « réel » se révélant inaccessible il en construit un modèle, qui est « *une représentation systémique et hypothétique d'une partie de la réalité, délimitée par la pensée en fonction d'un problème à résoudre* » J.C.Genzling (1991, pp.39-60)

Le modèle se situe à l'interface entre le champ empirique et le champ théorique, c'est pourquoi on est conduit à se poser la question de la nature des objets en physique : ce titre ainsi que les idées développées dans ce paragraphe sont empruntées à J.M.Dussau & al. (2000) : « *Bien que manipulant physiquement un objet tel un conducteur ohmique, le physicien n'en est pas moins confronté à raisonner sur des objets abstraits tels que la résistance, ... de plus lorsqu'il utilise des « outils mathématiques », le physicien se soucie peu de leur statut comme objets... Une réflexion s'impose sur la différenciation entre les objets de la réalité, les concepts et quantités abstraites de la physique et les représentations sémiotiques qui en sont faites dans l'enseignement...*

Prenons par exemple le fil de cuivre. Le signifié « résistance » n'est couplé à l'objet « fil de cuivre » que dans des situations pour lesquelles l'effet Joule est perceptible et dans le cadre de l'électrocinétique. Les physiciens le savent puisqu'ils ne s'intéressent à la résistance d'un objet que lorsqu'il est parcouru par un courant. »

Des entretiens d'une douzaine de professeurs stagiaires de sciences physiques... ont révélé « *une confusion entre la réalité phénoménologique et le modèle qui la représente dans le cadre de la physique, comme déjà signalé par J.L.Martinand (1987)* »

J.M.Dusseau & al.(2000, pp.96-97) définissent :

- « *l'espace de réalité comme l'ensemble des objets réels et des événements (postulés existant hors de la pensée humaine) et sur lequel va porter l'activité mentale de conceptualisation... L'acquisition de concepts en sciences physiques se fait par prélèvement d'informations dans l'espace de réalité (objets et situations expérimentales créées ou non)* » ce qui correspond à la question (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p.89) « *de quelles caractéristiques des objets a-t-on besoin ?* »
- « *une situation de référence comme le résultat d'une projection d'un événement de l'espace de réalité dans un cadre de rationalité donné ... un tuyau de cuivre peut être appréhendé dans le cadre de l'électricité... chaque cadre permet d'atteindre une vision parcellaire de l'objet, qui en tant que tel, dépasse l'ensemble de ses projections* »
- « *la modélisation est la création d'une relation entre les objets projetés de l'espace de réalité et les situations de référence : le tuyau de cuivre comme résistance électrique dans le cadre de l'électricité.* »

et concluent (p.21) « *L'espace de réalité est le support sur lequel l'observateur s'appuie pour construire sa représentation mentale de la réalité. Cette étape fondamentale constitue la mise en forme du problème physique, étape à laquelle il faut attacher un caractère modélisant... l'espace de réalité s'avère comme un élément indispensable pour modéliser la démarche de construction de concepts en physique.* »

2 - c – Fonctions du modèle

La première fonction du modèle est une fonction de **représentation** : « *il serait une image permettant de se représenter ce qu'on ne voit pas* » (J.L.Canal ; 1996, p. 42), et par là participerait à la construction du concept, à l'établissement des relations entre les éléments le constituant en intégrant les observations, les informations apportées par les intervenants dans l'apprentissage.

Cette représentation a été construite en réponse à une question : le modèle doit permettre une explication. Il a une fonction d'**interprétation** : « *l'important apparaît être dans la création de sens, correspondant au passage du modèle descriptif à un modèle explicatif.* » (C.A.Risset, 1996)

J.L.Canal (1996, p. 88) « *les chercheurs construisent des modèles qui permettent la simulation du monde réel en simplifiant la réalité* ». Si c'est le cas, il aura un pouvoir **prédictif**, ce que confirme C.Allègre (1987) : « *construire des modèles, représentations du monde... Ces modèles, une fois bâtis, deviennent des outils... provisoires. Les prédictions issues des modèles sont confrontées à la réalité, à l'observation, à l'expérience ; les résultats de ces tests sont autant d'éléments pour conforter ou modifier.* »

Ainsi, il est également un instrument de **prévision** et d'**explication**, comme l'écrit J.L.Martinand & al. (1980) : « *le modèle n'est pas la réalité, mais une vue simplifiée, construite en vue d'expliquer certains faits et qui devra souvent être modifiée pour en expliquer d'autres... ils doivent être considérés comme des outils imparfaits et susceptibles d'améliorations continues.* »

En résumé, le modèle n'a pas pour objectif de décrire le réel mais de prédire et, ou d'expliquer le phénoménal, et les concepts sont des outils pour penser qui s'articulent aux modèles. Ainsi, comme l'écrit J.L.Martinand « *expérimentation et modélisation se complètent pour assurer la formation et la mémorisation d'un savoir cohérent.* »

2 - d – Intérêt de cette analyse en vue de l'apprentissage

Ce dont l'enseignant doit être conscient :

1° - de la réelle difficulté pour l'élève

G.Bachelard (1938) rappelle « les lenteurs et les troubles » historiques du processus de formation des concepts, et « *il y a dans l'histoire des sciences une actualité minutieuse des anciennes erreurs pour désigner les difficultés de la pédagogie élémentaire* » : l'analyse épistémologique peut fournir des indications sur les difficultés prévisibles d'acquisition par les élèves de certains concepts.

Le modèle n'étant qu'une représentation partielle du réel, la **modélisation peut être abordée à différents niveaux**, l'enseignant peut passer par différents modèles du concept. On peut commencer par « *proposer aux élèves une situation modélisante qui ne soit pas entièrement satisfaisante, ébauche provisoire, adaptée au niveau d'accès à la connaissance de l'élève... à un moment elle devient inutile, car dépassée ; elle est abandonnée au profit de modèles plus performants, plus rigoureux... elle provoque le premier ébranlement des conceptions des élèves et elle est d'autant plus acceptée qu'elle se situe à un niveau proche de leurs conceptions.* » (J.L.Canal ; 1996, p.32)

2° - de conseils pour les aider dans la démarche d'approche

On trouve par exemple (G.Lemeignan & A.Weil-Barais ; 1992, p.56) : « *la construction des concepts répond à des besoins d'explication et à des besoins de prédictions... la construction des concepts est indissociable de problèmes à résoudre... Dans la construction des concepts la démarche hypothétique est centrale. Il s'agit d'amener les élèves à poser des hypothèses pour interpréter ou pour prédire des phénomènes.* » Aussi, (p.62-65) : « *il convient d'appréhender les concepts selon trois registres :*

- celui des représentations symboliques (graphiques, mathématiques...) qui servent à communiquer et à faire travailler le concept ;
- celui des représentations mentales qui réfèrent aux propriétés et relations invariantes constitutives du concept, comme aux invariants opératoires ;

- celui du champ expérimental, c'est à dire l'ensemble des situations et des questions explorables à l'aide du concept.

La maîtrise d'un concept nécessite la maîtrise et l'articulation de ces trois registres. »

Cette affirmation peut être mise en parallèle avec la définition du concept de G. Vergnaud (1990) donnée plus haut qui insiste sur le fait qu'« *étudier le développement et le fonctionnement d'un concept au cours de l'apprentissage ou lors de son utilisation, c'est nécessairement considérer ces trois plans à la fois* » suivi d'une analyse d'erreurs par confusions entre deux de ces niveaux.

J.M. Dusseau & al. (2000, p.9) précisent : « *on peut repérer les registres suivants : la langue naturelle, un système d'écriture symbolique, le graphique cartésien,...* » et citent R. Duval (1993) « *la compréhension d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité cognitive de conversion.* »

Ce qu'enseignants et élèves devraient découvrir à l'occasion de l'apprentissage de la physique :

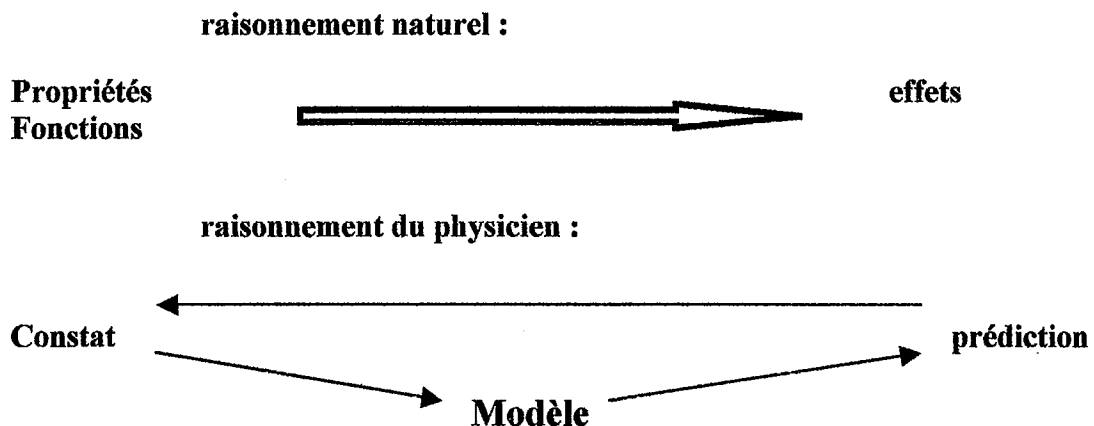
Nous avons décrit la relation dogmatique de certains élèves et de certains enseignants au savoir scientifique. Pour nous :

- **le modèle n'est pas la réalité**, or souvent ils sont confondus et on prend la description du modèle pour la description de la réalité ;
- tout ce qui est vrai, ne l'est que provisoirement : le modèle construit par l'élève est amené à évoluer, tout comme celui des scientifiques.

Pour amener les élèves à concevoir le **caractère révisable des modèles scientifiques** on peut imaginer de passer par des étapes de construction, des étapes d'apprentissage, qui n'épuisent pas les « pourquoi », mais qui amènent plutôt de nouvelles interrogations, « *ne jamais les considérer comme définitives, toujours ménager l'élément d'inquiétude indispensable à la renaissance de l'étonnement et au progrès intellectuel.* » J.L. Canal (1996, p.34)

Pour S. Johsua (1983, p.59) « *le problème se résume à passer de la gestion du modèle par le professeur à son utilisation (pratique ou conceptuelle) par l'élève et la classe. Il faut que la classe admette le modèle comme valable, qu'elle admette comme valable chaque étape de la construction et de la transmission.* »

Comment ? Nous verrons diverses suggestions que nous avons retenues, mais des chercheurs ayant observé qu' : « *abandonner son propre système de croyance pour un autre, n'est jamais chose facile, d'autant plus que les propositions qui les fondent ne sont pas vraiment intuitives et qu'on ne connaît pas encore leur domaine de validité* » suggèrent « *quand on explicite pour les élèves la différence entre leur mode de fonctionnement et le mode auquel on souhaite les faire accéder, ceci permet de clarifier les résistances qu'ils manifestent.* » (G. Lemeignan & A. Weil-Barais ; 1992, p.102) Ils schématisent ainsi la différence entre le raisonnement naturel et celui du physicien :



Ce schéma donné à des élèves a provoqué une vive réaction : « **pourquoi ne nous l'a-t-on pas dit plus tôt ?** » Il apparaît donc important de leur faire prendre conscience du **détour** (par la loi physique, le concept...) que nécessite la connaissance scientifique, suivie d'un retour au phénoménal qui renforce ou invalide le modèle.

Il illustre l'histoire de la science qui relate « *l'immémorial débat entre l'esprit et les sens* » d'après Y. Quéré (1997, p.1805), l'histoire de la pensée humaine et de la pensée de chaque élève.

3 – La transposition didactique

3 - a – Quelques éléments d'un modèle de référence acceptable par le physicien

Nous pouvons partir d'une question d'élève : « Pourquoi les électrons se déplacent dans un circuit ? » à laquelle une réponse fournie par un physicien pourrait être : « toute **charge électrique** plongée dans un **champ électrique** subit une **force**. Si cette force a une composante dans le sens de déplacement de la charge son travail est moteur, en sens inverse, il est résistant. » Que devient ce concept en électrocinétique ?

La connaissance scientifique admise sur ce sujet se trouve exposée dans la thèse de A.Benséghir (1989, p.66-71). Il la résume en un : « *modèle consistant dans la distribution macroscopique de charges statiques à la surface des conducteurs en circuit fermé* » qui seraient à l'origine de la « *production d'un champ local obéissant aux conditions du régime permanent et à celles de la topologie habituellement compliquée du circuit électrique.* »

Ce modèle justifie par exemple que le courant suive les fils... L'existence d'un régime permanent peut également trouver une explication à partir du **principe de l'inertie** d'I.Newton :

« *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état.* »

« *Est-il possible d'intégrer cette loi dans le déplacement des charges électriques ?* » demande J.L.Canal (1996, p. 208) et de répondre : « *l'électron se déplace et admettons qu'il arrive dans un milieu où aucune force ne s'oppose à son déplacement : il devrait pouvoir avancer sans le secours d'aucune force tout en conservant sa vitesse. C'est effectivement ce qui lui arrive dans un tube électronique... Si maintenant, il pénètre dans un milieu où son propre déplacement engendre des frottements, une force est nécessaire, une force motrice dont le travail compensera le travail résistant des (forces de) frottements. Qu'il soit dans un milieu résistant ou non, nous avons les deux éventualités de la loi de Newton : aucune force ne s'exerce sur lui, ou bien la somme des forces est nulle.* »

On peut également, comme l'élève, être sensible aux échanges énergétiques : dans les conducteurs résistants il faut un apport d'énergie pour que l'électron puisse maintenir sa vitesse. **Comment se fait cet apport d'énergie, exactement au bon endroit et en quantité voulue ?**

Dans les manuels scolaires nous n'avons trouvé qu'un seul modèle simplifié des échanges énergétiques rédigé par M.Ravaille (1964) et repris par J.L.Canal (1996, p. 208) :

« *Dans une portion de circuit génératrice, l'énergie électrocinétique est fournie aux charges grâce à la transformation d'une autre forme d'énergie ; dans une portion de circuit réceptrice, elle est fournie par les charges et se transforme en une ou plusieurs autres formes d'énergie.* »

Ce modèle, qui ne répond pas vraiment à la question, a l'intérêt d'être le seul à se préoccuper de l'énergie, même si la façon de le faire est critiquable : là où passe l'énergie est une question qui n'a pas de sens.

Il semblerait qu'un modèle plus acceptable soit décrit par H.Alonso et E.J.Finn dont des extraits ont été retranscrits par différents auteurs tels :

- D.Psillos (1988) « *Le concept de d.d.p. est relié au travail effectué par l'unité de charge entre deux points d'un champ par les forces électriques conservatives.* » (H.Alonso et E.J.Finn, 1972)
- J.L.Canal (1996, p.209) « *Il faut dépenser de l'énergie pour maintenir un courant dans un conducteur... en raison de l'interaction des électrons et des ions positifs du réseau cristallin, l'énergie des électrons est transférée au réseau, augmentant ainsi son énergie vibrationnelle. Ceci conduit à une élévation de la température du matériau qui est le classique effet thermique d'un courant connu sous le nom d'effet Joule.* » (H.Alonso et E.J.Finn, 1992)

Dans le cas d'un circuit simple, constitué d'une pile débitant et d'un fil résistant homogène, ces mêmes auteurs utilisent une situation analogique mécanique pour justifier la théorie électrique :

« *Nous savons qu'un corps en chute libre dans le vide a une vitesse $v = g.t$ qui augmente continuellement en fonction du temps. Mais si le corps tombe dans un fluide visqueux, son mouvement devient uniforme avec une vitesse limite constante. Par analogie, nous pouvons dire que l'effet du réseau cristallin peut être représenté par des forces « visqueuses » qui agissent sur la conduction des électrons lorsque leur mouvement naturel est perturbé par le champ électrique appliqué.* » (H.Alonso et E.J.Finn, 1992)

Ce modèle qui répond à la question se trouve ainsi traduit par J.L.Canal (1996, p. 210) :

« Dans le fil résistant, il y a un transfert d'énergie, donc des forces travaillent. Ces forces électriques qui s'exercent sur des charges qui circulent prouvent l'existence d'un champ électrique. Dans le récepteur (il nous semble devoir préciser : homogène et de section constante) la vitesse des charges est constante, donc ces forces ne provoquent pas une variation de l'énergie cinétique, mais leur travail sert à vaincre des frottements. La force électrique qui s'exerce sur une charge équilibre celle qui est due aux frottements. Le travail de la force de frottement correspond au dégagement de chaleur, l'effet Joule. »

Ce modèle débouche tout naturellement sur le concept de **différence de potentiel** (notée à l'avenir d.d.p.) relié à celui de force électromotrice du générateur, à l'origine d'un flux continu d'électrons qui circulent à l'intérieur des conducteurs. Il peut rapidement être mis en relation avec les autres concepts que nous comptons enseigner : l'**intensité du courant** correspond au débit des électrons, débit constant en régime permanent, mais qui dépend de la d.d.p. ainsi que du circuit qui est plus ou moins bon conducteur, plus ou moins résistant : un conducteur étroit aura une **résistance** plus grande, un débit plus faible qu'un large, par exemple.

3 - b – La nécessité d'une transposition

Ce modèle met en relation de nombreux concepts : différentes formes d'énergie, la force électrique, la force de frottement, le champ électrique, le travail d'une force, ... et fait appel à des lois ignorées des élèves à ce niveau scolaire, tel le principe d'inertie qui n'a rien d'intuitif, pas plus que le concept de la d.d.p. que les physiciens ont mis plus d'un siècle à élaborer.

Les concepts du physicien semblent donc impossibles à transmettre à l'élève sans avoir subi des transformations préalables, pour devenir un savoir prêt à enseigner, qualitativement différent de celui du physicien ou du maître.

Ces transformations, passage d'un objet de savoir à un objet d'enseignement, particulièrement étudiées par Y.Chevallard (1985), portent le nom de **transposition didactique**. L'objet de savoir appartient au domaine du savoir savant, celui reconnu comme tel par la communauté scientifique, qui, comme nous venons de l'expliquer, n'est pas enseignable sous cette forme. Nous laissons volontairement de côté les contraintes que doit respecter cette transposition (elles seront développées dans le paragraphe suivant) pour nous intéresser aux caractéristiques du savoir à enseigner (S.Johsua & J.J.Dupin, 1993, p.195) et qu'ils appellent « *la mise en texte du savoir* » : « *le savoir à enseigner se présente comme un « texte du savoir » qui suit un ordre logique, permet une évaluation des apprentissages.* » Il existe donc une différence entre la science qui se fait et celle qui s'enseigne (M.Hulin, 1984).

« Par exemple le modèle classique de l'électrocinétique repose sur une ou plusieurs théories plus vastes. Lui-même est constitué d'un corpus de concepts liés entre eux par un système de relations... Les concepts n'existent qu'en référence à d'autres. Le sens que prend chaque concept est indissociable du système de relations dans lequel il intervient.

Mais dans la transposition la situation s'inverse... la connaissance est délivrée par fragments, succession de chapitres et de leçons... Le modèle n'est pas donné au départ, mais l'objectif déclaré de l'enseignement. Il y a dissociation du modèle en concepts réputés indépendants que l'on met ensuite en relation : c'est la désynthétisation du modèle. » (S.Johsua & J.J.Dupin ; 1993, pp.196-97)

Plus loin (pp.251-52) ces auteurs rappellent que l'objet d'enseignement est généralement fourni par les programmes, mais que c'est un objet mort, qui ne peut être livré tel quel aux élèves. Ils expliquent que la suite de la transposition consiste à lui redonner vie : il faut le **recontextualiser** et le **repersonnaliser**.

3 - c – Les contraintes d'élaboration du savoir enseigné

Nous allons analyser de plus près les contraintes qui pèsent sur la transposition et par là même sur le savoir à enseigner : il doit être compatible avec le savoir savant, en lien avec notre analyse épistémologique, respecter une cohérence interne et tenir compte d'hypothèses sur l'apprentissage.

Légitimité par rapport au savoir savant

Nos analyses préalables ont décrit le modèle de référence actuel de la connaissance scientifique. Ce travail épistémologique a montré « *la nature « problématique » du savoir savant : celui-ci n'est pas donné une fois pour toutes dans un traité unique, il y a des points de vue différents... il n'y a pas de théorie universelle.* » (A.Tiberghien, C.Arsac & M.Méheut, 1994). Ce savoir savant évolue, peut être abordé avec des modèles différents ; il a un caractère hypothétique et révisable.

Ce choix épistémologique s'oppose à celui implicitement adopté dans l'enseignement habituel, basé sur l'empirisme, où l'observation et l'induction jouent un rôle central, où les concepts s'imposent comme un dogme, une vérité absolue. Voici quelques descriptions :

- « ces modèles étaient présentés comme une réalité attestée par de nombreuses preuves expérimentales accumulées par les savants. » (A.Tiberghien, G.Arsac & M.Méheut, 1994)
- « la physique à l'école s'expose de manière axiomatique, par définition ; les lois se vérifient miraculeusement sur une seule expérience : les expériences se lisent directement dans les termes des modèles... l'élève est sommé d'admettre. » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais ; 1993, p.18)

Ces chercheurs font allusion à ce qui représente une difficulté d'apprentissage pour l'élève, relevée aussi bien par M.Méheut (1994) que par A.Tiberghien, D.M.Psillos & P.Koumaras (1995). Ils soulignent l'importance de prendre en compte les difficultés d'apprentissage des élèves sur la relation entre les faits observés et les concepts physiques. Nous en reparlerons dans le paragraphe suivant.

Si nous cherchons à évaluer le degré de compatibilité du savoir à enseigner que nous allons proposer au savoir savant de référence :

- il lui sera fidèle en ce sens que :
 - o les modèles seront évolutifs,
 - o ils posséderont une cohérence interne et
 - o ils auront le statut hypothétique et révisable de la connaissance scientifique ;
- au départ, afin de le rendre accessible, son champ de référence sera plus limité, son champ de validité sera plus restreint, aura un caractère partiel. Il se rapprochera peu à peu du savoir de référence, au fur et à mesure de la construction du modèle, en raison de nos hypothèses sur l'apprentissage que nous allons exposer :

Les hypothèses retenues sur l'apprentissage

G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, p.20) nous rappellent que « l'idée que l'activité de l'élève est centrale dans le processus d'apprentissage, est la thèse principale du constructivisme », hypothèse sur l'apprentissage la plus largement admise de nos jours. L'élève qui apprend, le fait avec ses propres structures cognitives, c'est à dire ses représentations, qui filtrent et sélectionnent l'information, parfois la transforment pour l'intégrer aux structures existantes.

Cette hypothèse fondamentale nous paraît avoir pour première conséquence de devoir rendre l'élève **actif** : nous aurons à favoriser son questionnement afin de l'impliquer fortement dans une démarche qui lui permette d'acquérir un savoir (en réponse à une question, G.Bachelard, 1938), donc dans des activités de résolution de problème. Nous aurons à créer une interaction entre le savoir de l'élève et le savoir enseigné (J.L.Closset ; 1983, p.23) qui l'entraîne dans une construction de connaissances en partant de ses représentations initiales.

Par ailleurs nous avons déjà noté que ces **représentations filtrent et sélectionnent** l'information. Dans ces conditions, il paraît important que « l'élève ait eu l'occasion de prendre conscience et d'explicitier les idées qu'il a... d'être invité à prendre en compte clairement la différence entre ce qu'il pense et ce qu'on lui expose... sinon il pourra continuer à ignorer les informations... il peut croire qu'il ne s'agit que d'une autre façon de s'exprimer. » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais ; 1993, pp.20-21) car « on sait bien que pour acquérir des connaissances nouvelles il faut prendre en compte certaines informations qui dérangent. »

Mais pour prendre en compte une connaissance nouvelle, cela implique :

1° - de la percevoir comme nouvelle,

ce dont on vient de parler, mais déjà **de la percevoir**. Pour A.Tiberghien & D.M.Psillos (1995), l'élève n'est pas sensible à ce qui est pertinent pour le professeur :

- l'élève se situe au niveau **phénoménologique** qu'il interprète avec un raisonnement causal linéaire, par exemple la pile est la cause de l'éclairement de la lampe avec comme seul lien de cause à effet le courant ou l'électricité. Leur raisonnement s'applique directement aux objets réels, leurs propriétés et leurs fonctions....
- alors que les **théories physiques** sont plus élaborées et demandent un détour par un **modèle**, qui n'a pas pour objectif de décrire le réel, mais une fonction de représentation : il sert à décrire, prédire ou expliquer le phénoménal à l'aide d'outils pour penser : les **concepts**.

Dans ce contexte, ces auteurs proposent qu'une introduction à une théorie nouvelle parte des questions des élèves eux-mêmes, qui se situent au niveau des événements, et conduise le maître à partager avec la classe une sélection d'événements pertinents et de propriétés avec des relations causales entre elles, pour lesquelles une approche théorique puisse se mettre en place. Cette démarche se trouve en accord avec ceux qui pensent que théories et concepts doivent être associés aux activités intellectuelles qui les ont produits ou qui les mettent en oeuvre. C'est pourquoi ils ont choisi de partir des activités, ainsi « *les connaissances ont d'emblée un caractère fonctionnel* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p. 16).

Partant du phénoménal, comment arriver au concept ? car, « *aussi loin qu'on puisse pousser l'exploitation de données expérimentales, les concepts n'émergent pas d'eux-mêmes.* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p. 51). Et d'ajouter (p. 55) : ces constructions de l'esprit « *les élèves sont incapables de les construire tout seuls. Ce n'est que par un processus de transmission sociale que les élèves peuvent y accéder.* » Mais que transmettre ? Il faut que l'élève puisse le prendre en compte :

2° - de pouvoir la prendre en compte

Les travaux de L.S.Vygotsky (1962) ont introduit la notion de « **zone proximale de développement** », délimitée par ce que l'enfant est capable de réaliser aujourd'hui avec l'aide d'un adulte. Ce qu'il est en mesure de faire aujourd'hui avec l'aide des adultes, il pourra l'accomplir seul demain. La zone proximale de développement nous aide ainsi à connaître les pas futurs de l'enfant. Par ailleurs, nous retrouvons l'idée que le savoir savant n'est pas enseignable tel quel, qu'il faudra aménager des transitions, des étapes, en accord avec des hypothèses sur l'apprentissage qui procèderait soit :

- par **assimilation** : dans ce cas l'information est transformée pour être intégrée aux structures cognitives existantes. L'élève utilise son mode d'interprétation habituel pour donner sens aux informations reçues. Selon le cas, elle peut être souhaitable et il convient alors de mobiliser les ressources cognitives des élèves qui permettront l'assimilation, ou dangereuse :
- il faut inviter l'élève à risquer l'aventure de l'**accommodation** : elle nécessite de procéder à des changements importants qui déstabilisent, mais par étapes au sein de la zone proximale de développement, ce qui s'envisage sur une longue durée.

Par exemple on ne peut pas imaginer de faire construire le concept de différence de potentiel, concept historiquement très difficile, uniquement par les élèves. Il faut tenter d'aborder l'inconnu par le connu et donc « *opérer des aménagements didactiques des contenus pour les rendre accessibles aux élèves* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p. 25).

En résumé, la construction théorique du savoir à enseigner doit à la fois être cohérente avec l'expérience et compatible avec les repères des élèves. Ces deux contraintes ne sont pas immédiatement réalisables. La marge de manœuvre est le contenu du modèle à enseigner (d'après A.Tiberghien, D.M.Psillos & P.Koumaras, 1995).

Des « modèles propres à l'enseignement »

Nous venons de voir que les contraintes qui pèsent sur l'élaboration du savoir à enseigner viennent de :

- sa légitimité par rapport au savoir savant, qui ne prétend pas prêcher le vrai comme un dogme, mais se donner les moyens de se représenter le réel afin de mieux le comprendre et agir. Cette représentation est susceptible de remises en question, d'évolutions comme il arrive qu'il existe des théories différentes selon le cadre envisagé ;
- des hypothèses sur l'apprentissage, activité où l'élève utilise ses outils cognitifs pour observer et décrire le réel, mais « *modèles et théories ne se trouvent pas dans la nature* » puisque ce sont des constructions de l'esprit humain... L'élève utilise ses représentations que nous devons arriver à déstabiliser pour créer le besoin d'explication. Nous aurons alors à tenir compte de la démarche de modélisation qui demande un temps suffisant de familiarisation au phénoménal, puis d'établir des relations sémantiques entre objets / événements et les concepts.

Certains suggèrent, comme nous allons le voir, de proposer un modèle très simplifié, un « **modèle propre à l'enseignement** » (Y.Chevallard, 1985) que l'élève enrichira peu à peu, par étapes.

Si « *la première étape de la démarche pédagogique face au raisonnement naturel est de le déstabiliser en le mettant en échec* » d'après G.Lemeignan & A.Weil-Barais (p. 49) qui se proposent d'engager l'élève dans une démarche de formulation d'hypothèses avec contrôle expérimental, sur une situation choisie telle, que dans certains cas seulement, l'intuition conduise à des prédictions correctes. Ceci légitimerait la **proposition d'hypothèses (d'emblée gérables par l'élève)** qu'on lui demande de considérer pour construire une représentation des situations expérimentales. L'ensemble des hypothèses proposées doit être suffisant pour construire une représentation conduisant à des prédictions en accord avec les données de l'expérience.

Ces hypothèses constituent des « **modèles précurseurs** », outils d'explication et de prévision, qui ont pour fonction de proposer des transitions acceptables à la fois sur le plan psychologique et sur le plan épistémologique. Ces modèles ont certaines caractéristiques des modèles savants sans les posséder toutes : ils possèdent une cohérence interne, ils sont fonctionnels et évolutifs.

M.Méheut (1984) introduit un « modèle très simplifié » utilisé pour interpréter, puis avec (A.Chomat, C.Larcher & M.Méheut, 1992) utilise des « **germes de modèle** » et enfin (A.Tiberghien, G.Arsac & M.Méheut, 1994) écrivent : « *Le choix épistémologique conduit :*

- à imposer à l'élève un premier cadre de modélisation, condition nécessaire pour que l'approche des élèves soit, au moins partiellement guidée par la théorie...
- à renoncer à la construction de situations problèmes permettant à l'élève de construire intégralement les connaissances visées. Une partie seulement de la connaissance est construite par l'élève, en particulier les relations sémantiques : les règles syntaxiques sont au moins en partie imposées, la construction de leur signification est à la charge des élèves : on rejoint là le constructivisme. »

En résumé nous venons d'entrevoir la possibilité d'un savoir savant susceptible d'évolution, voire même de falsification, que l'élève ne peut pas reconstruire seul, une construction des connaissances qui ne peut être que progressive, en franchissant de petits gaps. Cette étude nous a suggéré une voie possible pour l'apprentissage de modèles en physique : proposer à l'élève l'ébauche d'un modèle qu'il enrichira, qu'il fera évoluer en réponse à des questions. Ainsi la connaissance de l'élève sera progressive, par étapes, à sa mesure, et aura le caractère hypothétique et révisable de la connaissance scientifique.

Cette démarche impose certaines accommodations avec le savoir savant, différentes de celles générées par les contraintes respectées par l'enseignement habituel. Elle accorde une priorité à la démarche de modélisation, à la cohérence qu'elle implique, conduit à une construction progressive d'un modèle qui restera imparfait et incomplet à un niveau d'apprentissage donné, mais susceptible de s'enrichir par la suite d'autres propriétés ou relations.

II – Le modèle de fonctionnement du circuit que nous souhaitons voir construire

La construction de la science est associée à l'histoire de la pensée, à sa capacité d'évolution et d'adaptation. L'histoire des sciences nous a montré que tout ce qui a été vrai, ne l'a été que provisoirement : « *la science est un vaste chantier qui reste toujours en l'état d'avancement, de construction et aussi de reconstruction.* » H.Gié (1997) C'est à un « chantier » scientifique que nous comptons engager nos élèves. La science se construit par étapes, la première à mettre en place est une représentation du circuit au collège compatible avec ce qui va suivre... puis au lycée aller plus loin.

1 – Les objectifs spécifiques de la séquence : le modèle élémentaire retenu

1 - a – Premiers éléments du modèle retenu

Nous cherchons à établir une description physique élémentaire de quelques aspects des circuits électriques : une image compatible avec la description d'un physicien d'un circuit simple comprenant dans un premier temps une pile et une ampoule est donnée par J.L.Closset (1983, pp. 41-43) « *un tel circuit peut être considéré comme organisant un transfert d'énergie entre la pile et l'ampoule. De ce point de vue, la pile a deux fonctions : elle est une réserve d'énergie stockée sous forme chimique et le lieu de la transformation de cette énergie chimique en énergie électrique. L'ampoule a aussi deux fonctions : elle est le lieu de la transformation d'une énergie électrique en énergie calorifique et lumineuse ; au contraire de la pile, elle ne stocke pas cette énergie mais la dissipe dans le milieu extérieur.* »

Comment est assuré le transfert d'énergie ?

« *Dans un circuit électrique la conduction est assurée dans les conducteurs métalliques, par des électrons dits libres. En l'absence d'une pile ou d'un générateur, ceux-ci ont des mouvements aléatoires ne privilégiant globalement aucune direction : ils sont globalement au repos. La présence d'une pile dans un circuit fermé provoque, à l'instar d'une pompe ou d'un moteur, le mouvement d'ensemble des charges libres du circuit. La quantité d'électrons libres du circuit reste évidemment constante. Lors de leur passage dans le filament de*

l'ampoule, ils entrent en collision avec les atomes de celui-ci. Il en résulte un échauffement important responsable de la luminosité observée. L'intensité du courant électrique est définie par la quantité de charges qui traversent une section du conducteur en l'unité de temps. Elle est identique en toutes les sections d'un circuit série (boucle). En régime permanent, il n'y a donc ni accumulation, ni disparition de charges, ni localement, ni globalement...

L'intensité du courant, le débit des électrons si l'on préfère, constant en tous points du circuit, est déterminé à la fois par la pile (d.d.p. aux bornes de celle-ci) et par le circuit tout entier. Si dans une première approche on néglige la résistance interne de la pile, on est amené à considérer que la d.d.p. aux bornes de celle-ci est une caractéristique indépendante des modifications éventuelles du circuit. Dans ces conditions, l'intensité du courant ne dépend plus que des caractéristiques du circuit extérieur. Chaque élément intervient localement, là où il se trouve, mais l'effet de cette action influence l'intensité du courant dans tout le circuit. En particulier dans un circuit série, la position relative des différents éléments du circuit n'a aucune importance quant à leur influence sur l'intensité du courant. Dans ce même circuit série la d.d.p. totale se répartit aux bornes de chaque élément proportionnellement à sa résistance... Ainsi la modification de la résistance d'un élément (action locale) a pour conséquence la modification de la d.d.p. aux bornes de chacun des éléments du circuit (effet global)...

Les actions locales dans un circuit électrique ont un effet global : la structure du circuit est systémique. »

1 - b - Remarques

Nous avons trouvé cette approche satisfaisante dans la mesure où, basée sur les mêmes hypothèses concernant l'apprentissage, elle prend en compte les représentations initiales de l'élève, qui ne sont autres que des tentatives de réponses à ses interrogations centrées sur l'énergie :

- elle aborde le circuit par son aspect énergétique. Elle tente d'exploiter l'idée initiale de l'élève, qu'il y a quelque chose de consommé dans le circuit (idée correcte en soi), mais ce quelque chose qui est consommé, ce n'est pas le courant qui lui est conservé, c'est de l'énergie... Ainsi les électrons ne sont ni retenus, ni consommés, ce qui peut aider à progresser par rapport au raisonnement séquentiel ;
- elle caractérise le générateur par la d.d.p. constante qui règne entre ses bornes. Si on souhaite se placer à un stade plus concret, dans un premier temps peut-être parlera-t-on de poussée ou de force (force qui sera ensuite à relier à la d.d.p.) avec laquelle le générateur est susceptible de mettre les électrons en mouvement. Cette caractéristique du générateur remplacerait avantageusement celle de l'élève qui se le représente à débit constant ;
- elle donne un rôle aux fils et permet de se représenter la différence entre ce qui se passe à l'intérieur d'un fil selon que le circuit est ouvert ou fermé ;
- elle parle de l'effet résistant de la lampe, effet sur l'ensemble du circuit considéré comme un système en équilibre, en interaction, vision globale fort peu partagée en milieu scolaire.

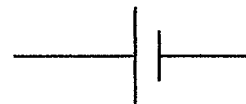
Toutefois, cette description qui définit le concept d'intensité, donne les lois de l'intensité et de la d.d.p. pour des dipôles en série, ne recouvre pas l'intégralité des objectifs de la séquence :

1 - c - Compléments appartenant au modèle retenu

La représentation précédente suppose que l'élève ait déjà une représentation du circuit et de la circulation au sein de celui-ci. Nos essais préliminaires ont révélé le contraire : nous sommes dans l'obligation de commencer par décrire un circuit comme une chaîne conductrice fermée, y compris à l'intérieur du générateur, alors que le schéma conventionnel utilisé par nos élèves pouvait laisser supposer le contraire :

Il faut que cette boucle conductrice soit complète pour qu'un courant puisse circuler (circulation = mouvement ordonné d'électrons libres, voir le fil)

Au contraire, s'il existe une ouverture, rien ne circule nulle part.



Les élèves empruntant le plus souvent un raisonnement causal linéaire, s'il existe un courant, il y a une cause à cette circulation, qui est la pile. Nous avons vu qu'elle sera caractérisée par la d.d.p. entre ses bornes, « *prédisposition de la pile à établir un courant* » D.M.Psilos (1988). Ce concept représentera d'abord une propriété de la pile : « *l'existence d'une tension provoque un courant* » A.Tiberghien (1984) puis, dans un deuxième temps, s'il circule un courant entre deux points, ces deux points ne sont pas à la même « altitude », ils ne sont pas au même potentiel, ce qui peut permettre d'établir un lien entre chute de tension et échange énergétique, lien précieux à connecter à la vision énergétique des élèves.

Nous comptons aller plus loin dans la construction du concept de résistance :

- il y a tout d'abord à comparer le rôle d'une ampoule et d'un résistor, tous deux transformateurs d'énergie qui s'échauffent quand un courant les traverse, mais aussi régulateurs de courant : la résistance sera la grandeur physique qui indique la difficulté de passage du courant, et nous souhaitons la nommer autrement que l'objet ;
- ce composant, comme tout élément d'un circuit électrique est conducteur, mais plus ou moins bon conducteur, il offre une résistance plus ou moins grande au passage du courant. D.M.Psillos (1994) suggère de l'appeler « conducteur-résistant », son effet conducteur étant illustré lorsqu'il est ajouté en dérivation (la résistance du circuit diminue), son effet résistant lorsqu'il est ajouté en série (la résistance du circuit s'élève) ;
- enfin, la d.d.p. étant la prédisposition de la pile à établir un courant, pour un générateur donné, selon la résistance du circuit l'intensité du courant sera plus ou moins grande : nous arrivons ainsi à une approche qualitative de la loi d'Ohm.

Le circuit peut aussi comporter des dérivations, il y a toujours conservation de la charge, ni accumulation ni perte : ce qui arrive à un nœud en repart, de même pour la pile, ou tout autre composant...

Nous aurons ainsi, peu à peu établi définitions et propriétés des différents concepts, en introduisant progressivement un symbolisme pour chacun. Il restera à les relier, qualitativement d'abord, en s'appuyant sur ce qui a été fait, par exemple à d.d.p. constante : une élévation de la résistance diminue le débit et vice-versa... avant de les relier, le plus tard possible dans la loi d'Ohm, représentation mathématique du système circuit, pour lequel l'élève aura établi une relation causale agent-patient bouclée (D.M.Psillos, 1997), qui aboutit à un état d'équilibre de l'ensemble des éléments en interaction. Cette dernière étape concentre toute la difficulté du passage au formalisme. Aussi demande-t-elle de prendre le temps de beaucoup travailler, en lien avec les problèmes qualitatifs déjà résolus, pour tenter de donner un contenu à cette relation. Nous souhaitons qu'elle ne résume plus le « savoir » de l'élève en une formule magique, dépourvue de sens, dont il ne se sert que trop rarement à bon escient.

Nous comptons, à l'occasion, expliciter le rôle d'éléments ou d'aspects souvent passés sous silence dans l'enseignement habituel :

- le fil de connexion, vrai composant, parcouru par un courant et qui donc possède une d.d.p. à ses bornes, faible, si faible qu'elle sera négligée, mais que nous ne pouvons ignorer pour la cohérence du modèle construit ;
- le mouvement des électrons à l'intérieur d'un fil selon que le circuit est ouvert ou fermé, c'est à dire la représentation de la circulation ;
- le circuit ouvert en lien avec l'interrupteur : le vocabulaire lié à l'interrupteur fait obstacle car l'élève se représente un robinet sur une canalisation d'eau : ouvert l'eau s'écoule, fermé l'eau est retenue en amont, dans l'attente de trouver la voie libre... ;
- le conducteur résistant, trop souvent réduit à l'état de coefficient de proportionnalité de la loi d'Ohm.

2 – Les aides à la construction du modèle par l'élève

Dans la mesure où nous pensons que les élèves sont incapables de construire seuls concepts et modèles, que ce n'est que par un processus de transmission sociale qu'ils peuvent y accéder, et qu'il ne s'agit pas de les leur livrer sous une forme d'emblée achevée, nous allons devoir préciser des outils pour l'apprentissage qui attribueront au maître des fonctions différentes de celles qu'il exerce dans l'enseignement habituel.

Nous nous plaçons d'un point de vue constructiviste (celui-ci s'opposant au point de vue purement transmissif) où l'élève est au centre des situations d'apprentissage, en position de se questionner par rapport à un savoir énigmatique :

- la première étape consistera à rendre l'élève actif, le mettre en quête de sens, faire en sorte qu'il se pose réellement des questions,
- puis qu'il ait la possibilité de s'approprier la connaissance nouvelle, ce qui pose le problème de la transmission de la connaissance des adultes aux enfants.

2 - a – Comment rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances ?

Nous avons trouvé quelques propositions que nous avons cherché à exploiter au cours de la séquence pour amener l'élève à se poser des questions :

S'appuyer sur le couple « étonnement-questionnement »

Nous nous étions déjà demandé : *« Comment donner du sens à un enseignement qui ne répond pas à un véritable problème pour l'élève ? N'est-il pas clair qu'en lui imposant des questions qu'il ne se pose pas, on est conduit à privilégier une pédagogie de la transmission... où tout part du professeur sans que jamais l'élève puisse investir ses intérêts réels... il y a le risque que l'objet d'enseignement reste étranger à l'élève »* (J.J.Dupin & S.Johsua, 1993). Cette remarque, nous l'avons rencontrée chez d'autres chercheurs :

- *« par le passé l'enseignement des sciences physiques s'est souvent résumé à l'apport de réponses toutes prêtes à des questions que l'élève ne se posait pas »* (M.Guiseppin, 1996)
- *« la science est un processus opératoire qui n'existe pas sans appropriation »* (P.Léna, 1999) ce qui, pour lui, passe par l'éveil du désir de science, la curiosité, le goût de comprendre...

Les travaux de J.Piaget (1967) ont montré l'importance de l'activité de l'élève dans la construction de son savoir : l'élève doit agir pour apprendre. Son psychisme se développerait dans ses relations problématiques au monde. De son côté le savoir scientifique se construirait en réponse à une question (G.Bachelard, 1938).

Il semblerait alors que l'étape essentielle soit *« la formulation par l'élève du problème qui sera ultérieurement l'objet de l'enseignement. Les situations d'apprentissage seraient à concevoir pour permettre une interaction entre un apport d'information extérieur à l'élève et le « déjà-là » de ce dernier. Le problème prendra alors du sens pour l'élève puisqu'il l'aura personnellement élaboré... »* (J.J.Dupin & S.Johsua, 1993)

Il s'agit de **transformer des situations d'enseignement en situations d'apprentissage**. Un des aspects de la démarche, qui consiste à faire en sorte que le problème du maître devienne un problème pour l'élève, a été étudié par G.Brousseau(1984). Retenons que *« tous les procédés où le maître ne donne pas lui-même la réponse sont acceptables. »*

Aussi, avons-nous souvent mis les élèves en présence d'un phénomène qui les a étonnés, et a produit un questionnement propice à l'émission d'hypothèses, en se souvenant que :

« Quand il se présente à la culture scientifique l'esprit n'est jamais jeune, il est même très vieux car il a l'âge de ses préjugés... Avant tout il faut savoir poser des problèmes... Dans la vie scientifique les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes... Pour un esprit scientifique toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. » (G.Bachelard, 1938)

Partir des représentations et faire en sorte qu'elles soient source de questions

Faire des sciences c'est se poser des questions, et en situation de classe, le problème doit être construit avec la classe. Aussi *« il s'agit non pas de communiquer les informations qu'on veut enseigner, mais de trouver une situation dans laquelle elles sont les seules à être satisfaisantes pour obtenir un résultat »* (S.Johsua, 1985)

Le maître doit trouver une situation, *« situation énigme »* (J.L.Canal, 1996, p.34) ou *« situation-problème »* ainsi définie : *« il s'agit de situations qui permettent à l'élève d'investir ses conceptions sur une notion donnée et de prendre conscience de leur insuffisance. »* (R.Charnay & M.Mante, 1990)

Cette situation doit, si possible, piquer leur curiosité, ou du moins permettre à l'élève de l'interpréter ou de prévoir à l'aide de ses représentations. L'élève se trouve impliqué : on lui demande d'exposer son point de vue aux autres, de l'argumenter, mais aussi d'être à l'écoute de l'autre ce qui peut être l'amorce d'un débat scientifique... En apprenant à écouter l'autre, à communiquer, à échanger des arguments, à confronter des idées, c'est l'occasion de prendre conscience de leurs explications et de leur nature hypothétique... Même si la situation de départ paraissait sans intérêt, la diversité des points de vue lui donne un caractère énigmatique suffisamment attractif pour que l'élève ait envie de résoudre le problème :

- en partant de prévisions, ils demandent à réaliser l'expérience, les observations... et
- si c'était une interprétation qui était demandée, ils sont en quête d'explications...

Ces interprétations concurrentes, expression des représentations des élèves prennent le statut d'hypothèses qui peuvent être mises à l'épreuve de :

- la critique par un débat scientifique, qui peut suffire à éliminer certaines propositions ou de
- l'expérience, qui joue le rôle de test d'hypothèses. Le plus souvent elle contredit les prévisions : *« le démenti leur est apporté par la situation sans que le professeur ou les autres élèves n'aient besoin d'intervenir. »* (R.Charnay & M.Mante, 1990)

L'élève se trouve conduit à raisonner sur le mode « **hypothético-déductif** », proche de la démarche réelle de construction du savoir en sciences : formulation correcte du problème, émission d'hypothèses, vérification de ces hypothèses et interprétation des résultats (d'après P.Pinelli & R.Lefèvre, 1993).

Nous avons partagé la démarche et les observations de J.L.Canal (1996, p.36) :

« Chaque fois... les élèves ont pu formuler leurs prévisions avant une expérience, prévisions assorties de leurs justifications. La distorsion avec les résultats expérimentaux provoque une insatisfaction, un étonnement, une curiosité, un questionnement et une demande d'explication qui feront apparaître la suite comme une réponse à des attentes, comme un besoin, et non comme la continuité obligatoire d'un enseignement. »

2 - b – Quelle place pour l'expérience ?

Place de l'expérience dans l'enseignement habituel

Nous allons distinguer l'expérience magistrale de l'expérience réalisée par l'élève :

1° - activités expérimentales en cours, conçues et réalisées par l'enseignant :

Elles ont pour objectif d'illustrer le concept ou la loi étudiée. Elles permettent une approche qualitative, d'identifier les paramètres pertinents, de donner sens à l'étude quantitative qui va suivre. Elle peuvent faire naître l'étonnement : *« il faut que le professeur joue le rôle de metteur en scène d'événements qu'il maîtrise parfaitement mais qui étonnent les élèves. Il doit choisir les événements les plus appropriés à la problématique qu'il veut mettre en place. Le questionnement qui en découle est propice à l'émission d'hypothèses. Cette étape de formulation d'hypothèses... développe la curiosité, l'imagination et la créativité des élèves. Il faut donc y apporter toute l'importance qu'elle mérite. »*

Elles permettent d'illustrer la démarche de structuration, de comprendre le cheminement de la pensée entre les observations et les lois qui sont étudiées.

Enfin, elles permettent la réalisation d'expériences particulières, par exemple dont il existe un seul dispositif ou nécessitant une attention spéciale pour ne pas être dangereuses... (d'après M.Guiseppin (1996)).

2° - activité expérimentale réalisée par les élèves :

Elle sont le plus souvent destinées à vérifier un modèle élaboré en cours *« il s'agit de « vérifier » une loi vue en cours et l'élève sait ce qu'il faut trouver... et il le trouve. »* (M.G.Séré, 1995) On peut, comme M.Guiseppin s'interroger sur l'intérêt de ce type d'activités, ayant nous même *« observé que l'on conditionne, petit à petit, les élèves dans une attitude passive où ils font ce qu'on leur demande sans se poser de questions. Nous prenons le risque de former des esprits engourdis parce que les élèves peuvent passer à travers les activités de laboratoire sans avoir rien appris, car il est possible de les mener à terme sans que le cerveau soit engagé dans le travail »*, (O.Soudani, M.Soudani & D.Cros, 1999).

Nous avons trouvé le rôle de l'expérience ainsi résumé par P.Pinelli et R.Lefèvre (1994) :

« L'enseignement des sciences physiques privilégie encore la démarche inductiviste pour laquelle l'observation est première et fournit une base sûre à partir de laquelle il est possible d'extraire la connaissance scientifique par induction. »

En effet, c'est la plupart du temps à partir d'une expérience de référence, parlante et simple (en apparence), que les élèves par une observation attentive et des mesures soignées, assistent à la mise en évidence d'une loi physique ; l'apprentissage est ensuite censé se renforcer par des expériences permettant aux élèves de répéter, de vérifier et d'appliquer. Il s'agit plus d'un apprentissage par transmission que par construction. »

Nous avons privilégié une place pour l'expérience plus active dans la démarche de déstabilisation des représentations puis de construction des connaissances :

D'autres rôles possibles pour l'expérience

L'expérience pose le problème du passage de la « réalité expérimentale » au modèle à l'aide des concepts, en partant d'un montage jugé perturbateur pour substituer aux essais sans idée, des essais par construction mentale. Nous avons essayé d'utiliser les activités expérimentales pour :

- construire et structurer un modèle, puis
- exploiter le modèle pour lui donner une utilité, un domaine de validité.

1° - construire et structurer un modèle :

« c'est la démarche la plus riche et la plus proche de la nature propre des sciences physiques. C'est celle qui développe le plus l'intuition, l'imagination, la créativité des élèves. C'est aussi celle qui s'appuie le plus sur leur étonnement. » (M. Guiseppe, 1996)

Une cause, parmi d'autres d'échec de l'enseignement habituel serait :

« les maîtres enseignent une connaissance nouvelle, mais les élèves ne se rendent pas compte du conflit qui existe entre leur connaissance initiale et la nouvelle connaissance. » (P. Kariotoglou, P. Koumaras & D.M. Psillos, 1995).

Il nous semble, qu'en partant d'une situation où l'on demande à l'élève des prévisions, qu'il fournit en mobilisant ses conceptions, en les argumentant, les justifiant, et dans la mesure où il prend conscience qu'il en existe d'autres... qu'il ne sait plus où est la « vérité », ces explications peuvent prendre le statut d'hypothèses à tester expérimentalement. Si l'observation peut être objective lors de ces contrôles expérimentaux, s'ils savent voir dans les résultats qu'ils obtiennent autre chose que ce qu'ils en attendaient, elle introduit un doute, elle est susceptible de les amener à appréhender les limites de leurs représentations, de créer une insatisfaction face à l'inaptitude de leur connaissance première à interpréter ou prévoir les phénomènes. L'existence de ces contradictions facilite l'émergence d'un conflit cognitif, et contribue à la recherche d'une réponse.

Cette étape représente le **temps du détour pour construire le problème** avec la classe, à partir de leurs représentations. Alors l'élève va demander à l'enseignant un apport d'information, qui deviendra :

- une connaissance qui ne sera plus reçue de façon passive

Une fois la contradiction discutée avec les élèves, la nouvelle connaissance devient acceptable surtout si elle ne prend pas la forme de « changements abrupts », mais plutôt celle de transition graduelle à partir de leurs idées intuitives initiales vers d'autres plus compatibles avec le modèle scientifique :

« le sous modèle une fois transmis, il est la propriété commune de la classe et du professeur et il va devoir être en mesure de pouvoir fonctionner ... il est une donnée de départ (au lieu d'être un point d'arrivée. » (S. Johsua, 1985, p.63)

- une connaissance qui aura un statut éphémère, hypothétique, révisable

En effet, si les concepts qui n'émergent pas spontanément à la lecture des expériences, ils n'ont qu'un statut d'hypothèse (choisie gérable par l'élève). Il va permettre à l'élève de construire une représentation conduisant à des prédictions en accord avec les données de l'expérience (d'après G. Lemeignann et A. Weil-Barais, 1993). Ensuite une démarche hypothético-déductive devient inéluctable : l'élève aura à tester le modèle avant de l'enrichir de propriétés :

2° - exploiter un modèle :

L'ébauche de modèle apportée par l'enseignant, l'élève doit le faire fonctionner sur des situations nouvelles pour se l'approprier. Il va appliquer son caractère prédictif à la résolution d'autres situations-problèmes. L'enseignant prendra soin de les choisir :

- d'abord proche de la situation initiale, afin que l'élève puisse réinvestir le même schème, par assimilation reproductrice, ces observations constituant un début de validation ;
- puis sur des situations un peu plus éloignées afin de passer à une assimilation généralisatrice (J. Piaget, 1967), ces nouvelles observations permettant de l'enrichir de propriétés et d'étendre son domaine de validité.

Cette analyse invite à partir des représentations des élèves, en utilisant des faits expérimentaux conflictuels : alors la connaissance nouvelle prend sens pour les apprenants sur une situation avant d'être réinvestie sur d'autres. Au cours de l'apprentissage, l'activité de l'élève sera :

- la formulation correcte du problème
- l'émission d'hypothèses
- la vérification de ces hypothèses et l'essai d'interprétation des observations expérimentales.

L'enseignant fournit une ébauche d'un modèle explicatif qui répond à leurs questions : l'élève cherchera à le tester en l'utilisant sur des situations variées pour affiner les modèles explicatifs et vérifier leur pouvoir prédictif.

L'expérience prend ainsi une place plus dynamique dans le processus d'apprentissage, participe à la médiation, en lien avec une démarche de test d'hypothèses, où l'activité de l'élève serait essentielle.

2 - c – Germes de modèle et modèles précurseurs

La nécessité d'étapes d'apprentissage d'un modèle

Dans le cadre d'une hypothèse constructiviste des apprentissages, nous considérons que l'élève apprend avec ses structures cognitives. Pour nos élèves, cela signifie par exemple qu'ils emprunteront un raisonnement causal linéaire.

De plus, les travaux de L.S. Vygotsky (1978) nous ont appris que pour qu'ils puissent s'approprier une connaissance nouvelle, il faut qu'elle soit assez proche de la connaissance initiale, bien sûr tout en étant compatible avec le savoir scientifique. Cette double nécessité conduit à aménager des transitions acceptables (vis à vis du savoir savant comme par rapport à l'élève et à son mode de connaissance) pour rendre le modèle accessible aux élèves : c'est le but de la transposition didactique.

C'est pourquoi, les auteurs parlent de développer une connaissance intermédiaire (J.L. Closset, 1983, p. 232), ou de germes de modèles (A. Chomat, C. Larcher, M. Méheut, 1992, pp. 119-169), ou encore de modèles précurseurs. Tous s'accordent sur l'idée de l'acquisition progressive d'un concept scientifique par modèles successifs, en partant d'un modèle élémentaire construit à partir des conceptions des élèves. Il doit être conçu à la fois pour que l'élève puisse le maîtriser, mais aussi être évolutif, et l'élève le fera évoluer : cette progression dans la construction du concept se ferait par étapes, chacune devant se présenter comme une nécessité, née d'une situation ne pouvant s'intégrer aux acquis antérieurs, tel le passage du circuit série à un circuit possédant une dérivation.

Ainsi les sciences se trouvent enseignées par paliers où l'élève apprend en construisant le concept peu à peu, par étapes, chacune étant caractérisée par des niveaux de formulation de plus en plus élaborés en fonction des tâches que l'on souhaite voir maîtriser et donc des finalités d'introduction de ces modèles.

Le modèle précurseur, ou germe de modèle, défini sur une situation donnée, l'élève aura à le faire évoluer en passant par des stades intermédiaires de connaissance au fur et à mesure que le circuit électrique se compliquera et que sa représentation de son fonctionnement se précisera. Le concept acquiert peu à peu des propriétés ainsi que de la pertinence pour expliquer et prévoir par réinvestissement sur des situations nouvelles.

Exemple d'étapes de construction d'un modèle de circuit électrique

(J.L. Canal, 1996, pp.88-98)

1° germe fourni aux élèves : « Dans les éléments constituant un circuit électrique, des grains, tous identiques, se déplacent dans un sens. Ce déplacement de grains correspond à ce que l'on appelle le courant électrique. Nous admettrons que ce déplacement se fait, à l'extérieur de la pile de la borne positive à la borne négative. Les frottements des grains contre le matériau constituant le filament produisent des échauffements tels que le filament est porté à l'incandescence. »

Intérêt : ce modèle permet de localiser le lieu de stockage de l'énergie, le lieu de l'utilisation, de découvrir le déplacement des charges et leur participation au transfert de l'énergie.

2° étape : essayons de situer, telles que nous les imaginons les positions des grains électriques dans le circuit :

- lorsqu'il est ouvert :
 - o 1° hypothèse : les grains sont dans la pile
 - o 2° hypothèse : les grains sont dans la pile et dans le circuit jusqu'à l'interrupteur
 - o 3° hypothèse : les grains sont dans tout le circuit

(Ces hypothèses des élèves sont discutées : les élèves trouvent des conséquences impossibles aux deux premières et s'accordent sur la dernière.)

- lorsqu'il est fermé.

Complément au modèle initial : « le courant électrique correspond à un déplacement des grains, et non à la présence de ces grains. »

3° étape : principe de conservation, non accumulation des particules électriques : le débit est constant dans tout le circuit (c'est ce qui sera nommé intensité du courant), mais pas la vitesse : plus le chemin est étroit, plus la vitesse est élevée (identique à l'écoulement d'une rivière qui doit franchir un canyon entre deux plateaux).

4^e étape : la pile : *« tout se passe comme si chaque grain chargeait toujours la même quantité d'énergie au passage dans la pile et allait la porter au récepteur où ce transfert d'énergie apparaîtrait comme un échauffement. Cette quantité d'énergie reçue par chaque grain est caractéristique de la pile : on l'appelle tension de la pile, elle se mesure avec un voltmètre et s'exprime en volts. »*

Remarque : nous nous permettons de critiquer cette étape, que nous considérons erronée, correspondant au modèle du livreur décrit par J.L.Closset (1983) comme une représentation spontanée d'élèves, en rappelant que vouloir préciser par où passe l'énergie est une question dépourvue de sens physique.

5^e étape : la résistance : plus elle est grande, plus la circulation est faible et plus la température diminue. Celle d'un interrupteur ouvert est infinie.

Puis il cherche à exploiter cette ébauche : on veut faire briller deux lampes, comment les installer ?...

Cette démarche d'approche du circuit électrique est organisée autour du concept d'énergie et autour de la découverte du fonctionnement d'un circuit simple constitué au départ d'un générateur et d'un récepteur reliés par des fils conducteurs. Elle procède par demande de prévisions sur le circuit ouvert ou fermé, une fois fourni le germe de modèle. Ces prévisions, assorties de justifications, permettent de faire émerger les représentations, d'en discuter, de les mettre à l'épreuve de débats scientifiques ou d'expériences avec le matériel et ainsi peu à peu enrichir le modèle...

Si nous en avons fait état, c'est qu'elle est proche de la nôtre, à la différence près que J.L.Canal se situe à un niveau élémentaire. Nos élèves issus du collège avaient assez de notions concernant le modèle atomique décrivant la structure microscopique de la matière, pour que le courant électrique puisse être défini comme un déplacement ordonné d'électrons libres dans les métaux et un double mouvement d'ions en sens contraire dans les électrolytes.

Nous apprécions qu'elle s'appuie :

- sur des équivalents concrets aux concepts du physicien qui permettront aux élèves de se construire une première représentation du fonctionnement du circuit explicative et interprétative ;
- sur des supports concrets, telles les analogies mécaniques qui, nous allons le voir, aident à une approche concrète des concepts, ce qui permet d'aborder l'inconnu à partir du connu.

2 - d – Les analogies

Un concept appartient à la pure abstraction, c'est pourquoi, en fonction des possibilités cognitives des élèves, il semble judicieux de leur apporter des aides pour en faciliter la construction progressive. Parmi celles-ci nous avons retenu le recours à l'analogie, en lien avec notre hypothèse d'une première approche concrète et donc qualitative. C'est pourquoi nous tenons à nous servir de cet outil d'apprentissage, comme aide à la modélisation dont certains aspects ne seront abordés qu'avec l'étude des hypothèses retenues.

Lors de l'introduction d'une notion physique abstraite, une technique pédagogique consiste à avoir recours à une illustration par une analogie avec un concept de la vie courante, et *« s'il est un domaine de l'enseignement de la physique où les analogies sont utilisées c'est bien l'électricité. La raison en est sans doute l'impossibilité d'une observation directe des phénomènes et la difficulté d'introduction de certains concepts. »* J.L.Closset (1983, p. 220) et d'ajouter (p. 234) *« elle est un passage obligé : le seul bon modèle c'est la réalité, mais elle est inaccessible. »*

Nous allons commencer par la définir, dans un premier temps en précisant ce qu'elle n'est pas, nous en donnerons le rôle, préciserons les limites et développerons les analogies que nous avons choisies.

Définition de l'analogie

Elle est à distinguer de la **métaphore**, qui établit une comparaison avec un autre domaine, en utilisant un mot propre à cet autre domaine, mais implicitement, sans développer et en particulier sans en étudier les limites. Un recouvrement s'établit entre ces deux domaines qui n'est pas sans dangers. Par exemple, en électricité, le mot **courant** fait référence au courant d'eau, celui d'une rivière qui coule. Ceci peut s'admettre au niveau de la définition du courant, débit de particules, ainsi que pour illustrer un nœud, une bifurcation où le débit se conserve de part et d'autre. Mais pour une rivière, le débit est constant en régime stationnaire quelque soit l'obstacle interposé : le générateur de tension se trouve assimilé à un générateur de courant, le concept de différence de potentiel est absent. Pour résumer, cette métaphore tend à conforter les représentations des élèves et **fait obstacle** au besoin de concepts.

La métaphore serait une image superficielle, suggérée à l'élève mais non travaillée avec lui. Au contraire, l'analogie révèle une parenté profonde, mais elle appelle des approfondissements. Ce n'est pas une simple ressemblance de structure, c'est une correspondance entre les deux termes de la comparaison, relations qui seront à établir par l'élève. Voici la définition donnée par l'I.N.R.P. (J.L.Canal, 1996, p.50) :

« Penser par analogie c'est rapprocher deux choses appartenant à des domaines différents, au nom d'une ressemblance entre les structures ou les rapports internes de ces choses.

Penser par analogie peut permettre de découvrir, de faire comprendre, de se représenter. En d'autres termes elle est un moyen facilitant pour passer de l'inconnu au connu, et pour se figurer ce qui est complexe à penser.

Ce mode de raisonnement n'a pas de pouvoir explicatif mais peut être utilisé comme moteur de la connaissance, en mettant sur la piste d'explications qui seront validées par d'autres démarches. En établir les limites est un moyen d'en maîtriser l'usage... »

Ainsi « le rapprochement de deux phénomènes pourrait aider à la conceptualisation de l'un d'eux » (J.L.Canal, 1996, p.51), pourvu que nous choissions « une analogie qui corresponde le mieux possible à quelques aspects du circuit électrique qu'elle est censée éclairer, et que ses autres aspects soient sans mystère et apparaissent comme n'intervenant pas dans les termes de la comparaison. » (J.L.Closset, 1983, p.220)

Dans la mentalité scientifique, l'analogie est utilisée après la théorie, pour se faire comprendre, éclaircir des idées abstraites, donner quelques explications, illustrer, tandis qu'en situation d'apprentissage, elle se situe en amont, lorsque l'esprit cherche à comprendre en surmontant une difficulté.

Nous partageons la remarque de J.L.Canal (1996, p. 229) :

« les analogies, si elles ne sont pas indispensables pour certains apprenants, sont utiles pour la majorité. »

Limites de l'analogie

Au cours de notre recherche, nous avons trouvé des témoignages de scientifiques et de chercheurs qui utilisent ou qui conseillent l'analogie tels J.L.Closset (1983), J.L.Canal (1996, qui l'analyse longuement (pp.50-63) ou S.Johsua (1983, qui en fournit de nombreux exemples), alors que d'autres en font le procès. Essayons de comprendre pourquoi :

- elle présente les mêmes risques que la métaphore : cet outil est trop souvent utilisé sans se soucier de ses limites et des dangers à les ignorer ;
- c'est un outil d'une utilité transitoire, délaissé après usage, mais c'est oublier que sans lui, la théorie n'aurait pas existé... ;
- elle sert plus souvent à illustrer des idées abstraites, pourquoi ne servirait-elle pas à les imaginer ou les construire ?

Dans la mesure où nos élèves ne devraient pas avoir de difficulté en électricité alors que nos recherches prouvent le contraire, nous avons eu envie de tenter de les aider par des analogies. Pour S.Johsua : « l'initiation ne peut se passer de l'analogie, mais sa qualité passe par une obligation : définir ses limites. »

L'apparence séduisante d'une explication facilement obtenue rend ce genre de raisonnement dangereux comme le montre l'histoire des sciences, lorsqu'on reste au stade de l'image familière : par exemple l'électricité assimilée à une colle, une glu ... comme le rappelle G.Bachelard (1938). Il faut veiller soigneusement à la qualité des analogies et s'astreindre systématiquement à faire rechercher ressemblances et différences. En effet, nous pensons que nous avons besoin d'établir des comparaisons pour comprendre, ce, à partir de deux capacités de l'intelligence :

- trouver des similitudes entre des situations malgré les différences qui peuvent les séparer ;
- établir des distinctions entre des situations malgré les similitudes qui les rapprochent, qui sont les moteurs du travail à l'aide d'analogies.

Nous la pensons, avec d'autres chercheurs, comme un passage obligé, le seul bon modèle étant une réalité inaccessible, mais nous devons l'utiliser avec circonspection, en précisant bien dans l'analogie suggérée, la part des éléments de ressemblance et la part des éléments de dissemblance. Malgré les risques, cet outil nous apparaît précieux : *« elles peuvent jouer un rôle important dans la structuration et l'acquisition de connaissances. Elles facilitent le déplacement des représentations vers un modèle plus simple. Elles demandent des va et vient entre conclusions auxquelles aboutissent ces images et expérimentation. Les prédictions suggérées d'un côté sont confrontées aux observations et expérimentations, les résultats surprenants d'expériences au modèle. Chaque cas contribue à l'enrichissement du modèle et à une meilleure perception des concepts. »* (J.L.Canal, 1993, p.62-63)

Comment choisir une analogie ?

L'utilisation de l'analogie en situation de classe, expérimentée par J.J.Dupin et S.Johsua (1994) les a conduits aux conclusions suivantes :

« elle doit permettre d'introduire dans le domaine cible une idée nouvelle, sous forme concrète...

le domaine de référence doit être moins complexe que le domaine cible...

l'analogie doit avoir une fonction descriptive...

il doit exister un grand isomorphisme structurel entre les deux domaines...

l'analogie ne portera pas sur une situation réelle complexe, mais sur une situation idéalisée où la structure n'est pas masquée. Nous proposons des expériences de pensée et non de nouvelles expériences...

l'analogie est l'un des moyens permettant d'introduire une hypothèse nouvelle qui n'apparaîtrait pas spontanément dans le domaine cible...

l'analogie permet aussi une démarche prédictive...

l'utilisation de l'analogie en classe est inséparable, en situation de classe de l'introduction du débat scientifique... » Ces deux auteurs insistent sur la nécessité d'« expériences de pensée », le domaine de référence devant être simple pour que chacun puisse concevoir son mécanisme.

Ces remarques peuvent être complétées par celles de J.L.Closset (1983, p.220) qui recherche une analogie pas trop proche de la situation que l'on cherche à expliquer, car plus elle s'en rapprocherait, plus elle serait susceptible d'être difficile à comprendre. D'autre part il souligne la place de l'élève qui aura en charge les relations à établir entre les termes de la comparaison :

« On ne peut pas traiter les analogies sans prendre en compte les aspects psychologiques... ce sont eux qui détermineront les relations que les étudiants établiront entre les deux termes de la comparaison ; il ne suffit pas pour cela que les relations existent... les structures cognitives de l'étudiant conditionnent ses perceptions... il nous paraît possible d'éviter le risque d'une perception non pertinente de l'analogie en évitant de renforcer les traits de celle-ci trop compatibles avec le raisonnement séquentiel.

En revanche, les analogies qui marquent une rupture nette par rapport au raisonnement séquentiel sont celles qui peuvent le plus aider l'étudiant à une meilleure compréhension du circuit électrique. »

Analogies choisies

Elles ont été choisies en lien avec les hypothèses de construction de la séquence : nous développerons les raisons de leur choix lorsque nous justifierons le déroulement de la séquence à partir des choix effectués. Pour l'instant nous allons préciser les analogies retenues et en quoi nous pensons qu'elles constituent des aides pour bâtir certains concepts de l'électrocinétique.

1° – analogie au circuit et à la circulation

J.L.Closset, à la suite de son analyse des conditions qu'il juge optimales pour le choix d'une analogie, propose « une analogie évidemment limitée au circuit série, mais qui s'avère assez efficace », à partir d'**une chaîne de vélo**. C'est une analogie mécanique concrète qui possède l'avantage de rendre compte d'un maximum d'aspects du circuit, même si elle n'explique pas tout : nous ne pensons pas courir le risque qu'un élève l'utilise dans un montage avec dérivations... Que permet-elle d'éclairer ?

- la chaîne effectue une boucle et, depuis le générateur il y a un départ et un retour de la chaîne : elle s'identifie au circuit ;
- la chaîne est une courroie de transmission, formée de maillons qui ne sont pas consommés, pas plus que les électrons du circuit...
- dans les deux systèmes il y a une source d'énergie, un transfert, une consommation... sans consommation de matière : le circuit électrique n'est que la courroie de transmission de l'énergie;
- le déplacement d'un maillon est liée à celui du précédent et entraîne le suivant, comme pour les électrons ;
- ce n'est pas la présence des maillons ou de la chaîne qui caractérise le transfert d'énergie, mais leur déplacement ;
- si ça circule en un point, ça circule partout, et nous dirons dans un premier temps (transposition didactique) partout à la même vitesse ou plus exactement avec le même débit : nous pouvons définir un débit de maillons. Comme ces maillons sont incompressibles et qu'ils se conservent, ce débit est le même en n'importe quel point de la trajectoire de la chaîne ce qui prépare le concept d'intensité et un travail sur le raisonnement séquentiel...

- ce qui permet le mouvement de la chaîne c'est le pédalier, comme la pile pour les électrons. Il existe donc une relation entre pédalier et roue comme entre pile et ampoule : on prépare le concept de système en interaction ;
- peu importe la place de l'objet freinant ou bloquant la chaîne : son frottement local influence globalement le mouvement de tous les maillons, son efficacité est indépendante de sa position. Si on introduit une ampoule dans le circuit, il apparaît des frottements et la vitesse de rotation diminue : c'est un début de concept de résistance.

Cette analyse montre la richesse de cette analogie : elle illustre aussi bien le circuit, la circulation que le concept de résistance en circuit série ; elle permet une première approche du concept d'intensité ainsi que de celui de circuit, perçu comme système, ensemble d'éléments en interaction. Elle aborde l'aspect énergétique qui est pris en compte au niveau des deux transferts : le pédalier, source d'énergie, est à l'origine d'un mouvement tout comme la pile, et cette énergie est transmise au « récepteur » roue ou ampoule. Le concept de résistance s'est trouvé tout naturellement introduit sous l'aspect de frein qui chauffe (les circuits avec dérivations permettront d'aborder l'aspect conducteur). Notre expérience a montré que, passé l'effet de surprise, les élèves sont à même d'exploiter cette analogie aussi bien pour prévoir que pour interpréter des faits qui les surprennent.

On peut ensuite rechercher la cause du mouvement de la chaîne et faire appel à une autre analogie :

2° – analogie à la différence de potentiel

La pile est la cause du mouvement d'ensemble des charges... Elle possède une force électromotrice, force qui met les électrons en mouvement, comme son nom l'indique...

Pour faire un pas de plus dans l'élaboration du concept de différence de potentiel, il faut pouvoir dire que l'existence d'une différence de potentiel aux bornes d'un conducteur provoque un courant qui traverse ce conducteur. Pour y conduire les élèves nous avons eu recours à l'**analogie gravifique**. Dans la nature pour qu'un objet, une pierre, de l'eau... se mette seul en mouvement dans le champ de pesanteur, il faut qu'il existe une dénivellation, une différence d'altitude, une différence de potentiel de pesanteur et un chemin possible. Par analogie, dans un circuit il y a quelque chose qui tombe, qui dégringole les potentiels : c'est dû à l'existence d'une différence « d'altitude électrique », appelée différence de potentiel électrique. Cette différence de « hauteur électrique » est à l'origine d'un mouvement : tout débit se fait en descendant les potentiels, ou les potentiels chutent tout le long du circuit. On peut imaginer de travailler cette analogie comme la précédente :

- où existe-t-il une différence de hauteur ? aux bornes d'un dipôle actif ? d'un dipôle passif ? d'un fil ? d'un interrupteur fermé ? d'un interrupteur ouvert ?
- à préciser lorsque le circuit est ouvert ou fermé ... et
- remarquer qu'une différence de potentiel existe chaque fois qu'un échange énergétique est possible : elle révèle l'existence d'une énergie potentielle qui ne demande qu'à se transformer en une autre forme d'énergie (cinétique, par exemple) lorsqu'un chemin est possible ;
- cette analogie entre le potentiel électrique V et l'altitude z permet de faire comprendre qu'il est nécessaire de choisir arbitrairement une origine (potentiel ou altitude zéro) et que ce choix ne modifie pas la valeur de la grandeur mesurable :

▪ différence de potentiel	$U_{AB} = V_A - V_B$
▪ hauteur, dénivellation	$h_{AB} = Z_A - Z_B$

Il reste à la faire fonctionner dans des démarches de prévisions ou d'interprétation, illustrées à l'aide de schémas d'altitude, pour expliquer la différence de potentiel aux bornes de dipôles montés en série, en dérivation ou de montages mixtes.

En conclusion, pour illustrer notre propos, voici comment nous avons pensé la **construction des concepts de base de l'électrocinétique avec des analogies** :

- 1 – demander des prévisions sur le circuit simple, ouvert ou fermé, pour faire émerger les représentations ;
- 2 – faire exprimer les prévisions, afin que les élèves prennent conscience de leur diversité : qui a raison ? pour répondre, faire appel à l'expérience ;
- 3 – confrontation des résultats prévus avec ceux de l'observation : les différences étonnent et mettent en quête d'explications ;
- 4 – apport d'un germe de modèle de circulation (déplacement de particules électriques, électrons dans les solides, ions dans les électrolytes, dans un sens donné) et de circuit (une boucle fermée) ;

5 – demande de prévisions pour faire exprimer les représentations sur un circuit série qui fonctionne, puis dont une lampe est en panne... on reprend les étapes 2 et 3 ...

6 – nouvelle nécessité de modéliser pour interpréter les résultats expérimentaux : une simple image ne suffit plus. Le modèle se construit à partir de l'analogie mécanique de la chaîne de vélo dont on analyse le fonctionnement et les ressemblances avec le circuit et ce que cela permet de se représenter :

- le circuit comme une boucle fermée y compris à l'intérieur du générateur ;
- la circulation qui se fait dans un seul sens à débit constant ;
- le lieu de stockage de l'énergie et le lieu d'utilisation ;
- un moyen de transfert par les électrons ;
- le frein qui ralentit toute la chaîne y compris au niveau du générateur ;
- deux freins qui freinent plus qu'un seul ;
- la chaîne cassée : rien ne circule nulle part, même au niveau du générateur...

7 – puis par étapes, enrichissement progressif des concepts de courant, puis d'intensité, de résistance, de d.d.p. avec un travail similaire sur des circuits avec dérivations, puis des circuits mixtes.

Cette démarche paraît susceptible de permettre à l'apprenant de se construire une représentation du fonctionnement du circuit. Celle-ci aura un caractère hypothétique, provisoire, limité comme l'analogie utilisée, mais évoluera avec la complexification du circuit.

3 – Le rôle du maître

Son rôle est en lien direct avec la **conception de l'apprentissage**. R.Charnay et M.Mante (1990-91) en explicitent quelques unes :

La conception « commune » d'après eux « considère que l'apprentissage est basé sur l'écoute, l'observation, l'imitation, la reproduction du modèle enseigné. Il faut donc bien écouter, bien apprendre, bien mémoriser et s'entraîner pour pouvoir enregistrer, puis reproduire et enfin utiliser les connaissances. La qualité de l'apprentissage est conditionnée par celle de la transmission : le bon maître est celui qui explique bien, qui sait illustrer son discours par des manipulations, des schémas. » (p. 39)

Une autre conception, influencée par le **béhaviorisme** (p. 40) « repose sur l'idée que, pour faire passer un élève d'un état de connaissance à un autre, il faut ménager des étapes intermédiaires graduées, allant du simple au complexe, en découpant les compétences globales en compétences élémentaires. »

Dans ces deux perspectives, les erreurs sont considérées comme des accidents qu'il serait possible d'éviter... si l'élève écoutait mieux, s'entraînait, améliorerait son raisonnement... ou si l'enseignant revoyait sa progression, améliorerait ses explications ou encore disposait d'exercices mieux gradués...

Dans la perspective **constructiviste**, l'erreur est l'expression d'une forme de connaissance. « *L'erreur n'est pas seulement l'effet de l'ignorance, de l'incertitude, du hasard, que l'on croit dans les théories empiristes ou béhavioristes de l'apprentissage, mais l'effet d'une connaissance antérieure, qui avait son intérêt, ses succès, mais qui, maintenant, se révèle fausse, ou simplement inadaptée. Les erreurs de ce type ne sont pas erratiques et imprévisibles, elles sont constituées en obstacle. Aussi bien dans le fonctionnement du maître que dans celui de l'élève, l'erreur est constitutive du sens de la connaissance acquise.* » (G.Brousseau, 1983).

C'est dans cette perspective que nous nous situons. Nous considérons que :

- c'est l'élève qui assume lui-même son propre apprentissage : personne ne peut apprendre à la place d'un autre. J.Piaget (1976) a souligné l'importance de l'activité de l'élève que le maître aura à solliciter ;
- apprendre, c'est construire pour soi une représentation utile des réalités à partir de ce qu'on sait déjà. Mais il s'agit de construire des concepts auxquels on ne peut accéder que par transmission sociale et par étapes.

Nos hypothèses donnent au **maître** le rôle de **gestionnaire de l'apprentissage** :

- il doit rendre l'élève actif, le mettre en situation de produire des connaissances ;
- il doit lui permettre d'apprendre à partir de ses erreurs, c'est à dire
- rendre la connaissance scientifique acceptable dans le cadre de ses structures cognitives.

C'est ce que nous allons développer, en partant de la condition première pour qu'il y ait apprentissage, c'est à dire réponse à une question : il faut que l'élève soit conduit à s'interroger, mais comment faire pour que la

question du maître devienne également une question pour les élèves, c'est à dire qu'elle ait du sens pour l'élève ?
A cette question G.Brousseau (1986) répond par :

3 - a – La dévolution du problème dans un cadre constructiviste

L'enseignant a la mission de faire accepter à l'élève une situation d'apprentissage dite « *a-didactique* » (en ce sens qu'il disparaît d'elle l'intention d'enseigner), c'est à dire qu'il faut arriver à ce que l'élève s'approprie la question, qu'il entre dans la question qui jusque là était celle du maître. Il précise que cette situation doit provoquer chez l'élève une **interaction** la plus indépendante et la plus féconde possible, entre sa connaissance initiale et les phénomènes avec lesquels il va se trouver en présence..

Ainsi, « *il s'agit non pas de communiquer les informations qu'on veut enseigner, mais de trouver une situation dans laquelle elles sont les seules à être satisfaisantes pour obtenir un résultat.* » (J.J.Dupin & S.Johsua, 1993, p.112) Le maître aura à « *construire une « situation artificielle » dans le but de permettre aux élèves de s'emparer du problème, lui-même calibré en vue de provoquer la nécessité de la construction par l'élève de la connaissance nouvelle.* » (p.260)

Dans ce cadre, où le sujet assure lui-même son propre apprentissage, crée lui-même sa propre signification, **le maître confie à l'élève la charge d'apprendre** : la situation doit faire naître le besoin de comprendre, qui va nécessiter l'apport de connaissances. Pour notre part, nous avons joué sur le couple « **étonnement – questionnement** » en partant des représentations de l'élève et en faisant en sorte qu'elles deviennent source de questions et de demandes d'explications.

La situation dans laquelle le maître doit engager l'élève, souvent nommée « **situation-problème** », doit dans un premier temps être assez énigmatique pour que l'élève cherche à résoudre le problème : il le fera à l'aide de ses structures cognitives qui généralement lui permettent d'interpréter ou de prévoir. La mise en commun de ces prévisions, doit faire apparaître une diversité de points de vue, qui seront à l'origine de **démarches hypothético-déductives** : si... alors...

A ce stade, nous avons pu constater que le plus souvent l'élève met en doute ce qu'il croyait savoir et cherche le verdict de l'expérience pour tester les hypothèses en présence. L'observation est souvent source de surprises et de **conflit cognitif** : il cherche à comprendre, il veut donner sens à la situation qu'il vit (il y a identification d'un obstacle, prise de conscience devant faciliter son dépassement), il est à la recherche d'une explication.

Le maître est sollicité et peut apporter un début de réponse avec une ébauche de modèle, par exemple l'image d'une boucle fermée pour le circuit, associer la circulation à un mouvement, informations qui peuvent être couplées avec une analogie comme celle qui peut s'établir entre le circuit électrique et une chaîne de bicyclette, et leur demander de la faire travailler : si la chaîne est cassée... le circuit est ouvert... quelle conséquence peut-on en tirer au niveau du circuit ?... Rien ne peut circuler nulle part... puis : comment ferais-tu pour le vérifier ?...

Le maître proposera un nouveau circuit, (c'est encore mieux si c'est l'élève qui s'interroge de lui-même sur un autre circuit...), sur lequel il demandera de nouvelles prévisions... En effet, le dépassement des obstacles n'est jamais le produit d'une situation problématique unique ou d'un conflit cognitif limité. De plus, la multiplication des situations où le modèle introduit se révèle fécond permet d'enrichir les concepts de propriétés nouvelles ce qui tend à les rendre plus familiers, à révéler leur utilité à l'élève ce qui serait susceptible de l'inciter à s'en servir, ayant testé un domaine de validité non restreint à une situation exceptionnelle.

L'activité du maître a été particulièrement observée et analysée par A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais (1998), A.Dumas-Carré & M.Goffard (1997) et A.Chomat, C.Larcher & M.Méheut (1992). Ces chercheurs distinguent deux fonctions :

« *A des degrés divers, les professeurs interviennent selon les moments sur le mode de la tutelle ou de la médiation :*

- *dans le cadre de la tutelle, c'est l'exécution des tâches qui détermine les interventions du professeur ;*
- *dans le cadre de la médiation, c'est le rapport au savoir qui est travaillé. »*

3 - b – Le maître médiateur

« *Il s'agit de prendre en compte le fait que la rencontre des élèves avec la science a une dimension conflictuelle potentielle, résultant des singularités de la science comme système de pensée et comme activité. Le*

professeur est médiateur au sens où il est intermédiaire entre le monde des connaissances et des pratiques scientifiques et celui des élèves. Sa fonction est de négocier avec les élèves des changements cognitifs... Il exerce un rôle de médiateur auprès de chaque élève pris dans sa singularité, mais aussi au sein du groupe classe. » (A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais, 1998, p.6)

Ces chercheurs se sont intéressés aux conditions d'existence et à la nature des échanges entre le professeur et les élèves pour tenter de comprendre comment les points de vue évoluaient.

Pour qu'il y ait échange, entre autres conditions, ils pensent qu'il faut :

- partager quelque chose : sur quel type de point commun peut-on s'appuyer pour embrayer les échanges professeur-élève (comment est-ce possible, vu le décalage entre leurs représentations et les raisonnements du physicien, leurs différents raisonnements et le système conceptuel ?
- que les élèves aient l'occasion de s'exprimer par rapport à l'enjeu cognitif : modélisation, construction de concepts.

Pour faciliter ces échanges, la médiation du maître va s'exercer à deux niveaux :

- entre le savoir savant et le savoir à enseigner et
- dans le rapport de l'élève au savoir.

La médiation par rapport au savoir

L'élève apprenant à partir de ce qu'il sait déjà, le maître doit être en possession des explications des élèves, être attentif aux ressources cognitives qui peuvent être mobilisées, avant d'envisager un apprentissage. Il connaît par ailleurs les concepts, modèles et théories du physicien qui, tels quels seront inaccessibles à l'élève, affirmation en référence à la zone proximale de développement définie par L.S.Vygotsky (1978).

Ces éléments de réflexion conduisent à la nécessité d'une **transposition didactique** qui transforme le savoir savant en un **savoir acceptable** tant du point de vue de la science (légitimité par rapport au savoir de référence) que du point de vue de l'élève dans le cadre de nos hypothèses sur l'apprentissage. Ce savoir doit posséder deux propriétés :

- être **fonctionnel** pour permettre à l'élève d'interpréter des situations problématiques vis à vis de ses représentations et de fournir des prédictions sur de nouvelles situations ;
- être **révisable**, car il doit être progressif et évoluer avec les possibilités cognitives de l'élève.

Dans ce contexte, le maître aura en charge la construction :

- d'un germe de modèle à proposer comme solution hypothétique du premier conflit cognitif, choisi assez proche des représentations des élèves pour qu'il puissent s'emparer de cette hypothèse, la tester, éprouver son domaine de validité et ses conséquences...
- d'étapes d'apprentissage, qui par des transitions acceptables, permettront l'enrichissement progressif du modèle de départ vers
- le modèle qu'il aura retenu comme but de l'apprentissage.

Ainsi, le savoir savant « fait l'objet de la médiation didactique » (A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais, 1998, p.69) dont le but « est de guider les élèves dans un processus toujours plus conscient de construction de connaissance. Ce processus consiste dans un passage graduel des faits, langages, représentations que les élèves ont déjà, aux faits, langages et représentations caractéristiques de la connaissance » scientifique.

A chaque proposition des élèves il doit savoir si elle est compatible ou non avec le modèle qu'il souhaite voir se construire, avec le degré d'approche du modèle scientifique choisi, et quoiqu'il en soit la recevoir comme une question, une hypothèse dont on cherchera ensemble des conséquences pour la valider.

Nous allons maintenant développer ce rapport entre l'élève et le savoir car le maître y joue aussi un rôle de médiateur.

La médiation dans le rapport de l'élève au savoir

Suite à la dévolution du problème que l'élève a en charge de résoudre (qui peut elle-même être négociée...), l'élève se trouve en devoir :

- de **résoudre un problème** :
 - o pour qu'il y ait problème, il faut que celui-ci ait du sens pour celui qui doit le résoudre ;
 - o un problème est une **interaction avec la tâche et avec autrui**,
- de réaliser une **tâche qui est en elle-même un outil de médiation**, en ce sens qu'elle est à l'origine de changements de points de vue, changements accompagnés par « l'enseignant-médiateur ».

Au cours de la réalisation de la tâche l'élève est invité à exprimer :

- ses observations ou ses prévisions,
- ses interprétations ou ses justifications,
- ses questions.

Dans les échanges qui s'établissent alors, pour **être sûr de se comprendre**, l'élève peut être amené à **explicit** sa représentation ou son interprétation du message de l'enseignant : un discours oral fonctionne avec beaucoup d'implicites, il peut exister une distorsion entre celui qui le produit et l'interprétation de celui qui l'écoute.

Au cours d'un tel échange il est bon d'employer des mots communs qui peuvent constituer un **langage intermédiaire**, pour parler ensemble et se mettre d'accord sur un système de **représentation intermédiaire** qui sera une étape de la négociation. Pour que cela fonctionne pour l'élève, il faut rester assez proche de l'élève, accepter que l'élève parle mal au départ : un jeu de **reformulation** réciproque où le professeur redit ce qui a été dit par l'élève et l'élève ce qui a été dit par le professeur avec un peu plus chaque fois, peut constituer un moteur d'une dynamique interactive. L'enjeu dépasse alors le simple fait de comprendre ce qui a été dit par l'élève. L'enseignant devient spécialiste en reformulation de proximité qui, par une reprise dans une forme canonique de ce qui a été dit, amène l'élève à progresser.

Une autre démarche de médiation peut consister en un jeu de « questions-réponses » par lequel le professeur conduit l'élève à accéder à son point de vue, qui devient acceptable pour l'élève. Au cours de tels échanges, des formes langagières hypothétiques, telles « il se peut.. » ou « il me semble.. » peuvent permettre de faire distinguer à l'élève ce qui est particulier de ce qui est universel, ce qui est une éventualité, une hypothèse de ce qui est une réalité, ce qui est du domaine du phénomène de ce qui est du domaine du concept... et ouvrir des pistes de réflexion.

Il arrive que ces processus de traitement de l'information entre le maître et l'élève **créent une signification qui ne préexiste pas au discours, mais qui est le fruit des échanges : l'interaction au cours de la communication permet la construction d'une signification partagée**. Il sera alors important de la mettre en évidence en faisant le point en fin de parcours : le professeur aura à initier la récapitulation de la nouvelle connaissance qui fera peut-être l'objet d'une négociation... car c'est un moyen pour l'élève de savoir si la signification qu'il a construite est la bonne, et pour l'enseignant de s'assurer d'une co-construction du savoir dont l'apprentissage progresse par approximations successives, ce qui amène à des compromis entre des exigences de validité de la représentation, et des exigences langagières, occasions de s'assurer de cette validité. G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, p.199) insistent « *sur l'importance des tâtonnements, de la réflexion et des contrôles... expérimentaux et par la pensée, qui seront préférés aux contrôles normatifs* »... il convient « *d'encourager les élèves à traiter les problèmes avec leurs propres outils conceptuels.* »

Le rôle de l'enseignant est de faire construire des connaissances, pas de donner des réponses, ce qui se traduit en particulier par le renvoi aux élèves des questions qu'ils posent : « comment ferais-tu pour savoir ? » A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais (1998, p.205) résument les différents aspects que revêt sa compétence :

- *interpréter les propositions des élèves en se glissant dans leur mode de pensée de façon à ce que ces propositions puissent acquérir pour lui une signification et qu'il puisse ensuite trouver un terrain de discussion possible commun avec les élèves ;*
- *s'assurer que la communication est suffisante pour permettre une co-construction ;*
- *contrôler la compatibilité entre une proposition de formulation approximative et une représentation scientifiquement acceptable ;*
- *repérer les contradictions explicites ou potentielles ;*
- *faire converger les discussions, c'est à dire ne pas perdre de vue les enjeux visés, et communiquer des points de repère aux élèves sur les acquis de leur réflexion. »*

3 - c – Le maître tuteur

Le tuteur veille à l'exécution des tâches, ce qui représente des activités qui se trouvent explicitées par (A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais, 1998, p.5) : « *Dans l'interaction, le maître est un tuteur qui exerce une action sur l'élève : il propose à l'élève des situations et des questions, il oriente son activité, il réduit les possibles, il lui propose des sous-buts, il lui montre, il l'informe et explique.* »

Il intervient sur l'élève pour le faire agir et comprendre. Il doit être en possession des représentations des élèves pour « *mettre en place des situations d'apprentissage. Il favorise et guide les discussions des élèves pour explorer le champ de validité, montrer les limites et faire évoluer les « modèles alternatifs »...* Il doit créer un climat de classe favorable à l'expression de tous... faire comprendre aux élèves que tout ce qu'ils disent à de l'intérêt, peut être écouté par le professeur et les autres élèves, mérite d'être discuté. » (A.Dumas-Carré &

M.Goffard, 1997, p.54), puis (p. 61) « *les élèves ont de nombreuses occasions de s'exprimer librement sans crainte de « dire des bêtises », sachant qu'ils ne sont ni jugés, ni sanctionnés. Ceci permet au professeur... de mieux ajuster ses intentions et ses interventions, guider et relancer les activités des élèves au bon niveau pour eux. En termes d'apprentissage, l'efficacité doit être meilleure puisqu'on évite de perdre du temps à propos de points déjà maîtrisés, et on évite aussi, à l'opposé, l'inefficacité des discours ou activités hors de portée des élèves. En écoutant les échanges des élèves, le professeur peut, plus facilement, adapter ses objectifs et ses interventions aux possibilités des élèves.* »

Ainsi l'enseignant n'est plus celui qui sait et qui révèle peu à peu la bonne parole : une partie de la connaissance est construite par l'élève en interaction avec l'expérience, l'enseignant et ses pairs. Un conflit cognitif est à l'origine du progrès : le tuteur a « *organisé le monde physique auquel l'enfant pourra accéder par des expériences utiles* », puis « *par ses questions il aide à la déstabilisation qui permet le conflit et la prise de conscience* » de l'insuffisance des représentations. (A.Dumas-Carré & A.Weil-Barais, 1998, p.34) Selon les phases d'avancement dans le travail, il se comporte comme un guide ou comme un médiateur, mais dans les deux cas il prend appui sur le savoir présent de l'élève, ainsi ce qui est communément appelé « erreur » se met à jouer aussi un autre rôle.

3 - d – Le statut de l'erreur

J.L.Closset (1983, p.27) invite à préciser que toute erreur n'est pas forcément un bon indicateur du « savoir commun ». Celles qui ont à nos yeux un rôle à jouer lors d'un apprentissage ne sont en rien dues à la distraction : elles découlent d'une « connaissance première » qui peut « *dans certains cas conduire à une réponse identique à celle fournie par le savoir scientifique, mais conduit inévitablement dans d'autres cas à une réponse, ou à tout le moins une justification, incompatible avec le modèle physique... car dans sa structure et dans sa démarche, elle n'est presque jamais conforme au savoir scientifique.* »

L'erreur est l'expression d'une forme de connaissance

Dans un cadre constructiviste, l'erreur acquiert un autre statut. Le professeur n'est plus celui qui déclare bon ou mauvais ce que produit l'élève. Il s'y intéresse au plus haut point car elle est l'expression d'une forme de connaissance. Il apparaît utile que le maître prête attention à l'erreur :

1° - L'attention à l'erreur comme révélateur des représentations des élèves

L'erreur permet une représentation par le maître des connaissances actuelles de l'élève :

- des règles d'action implicites qu'il utilise et
- de leur domaine d'efficacité, de réussite... qui confortent l'élève dans sa représentation.

Ce savoir qui s'est avéré utile, peut répondre aux nécessités de la vie de tous les jours de manière plus simple, plus rapide et finalement plus efficace que le savoir scientifique. Si J.L.Closset (1983, p.231) paraît se demander « est-il à détruire ? », en fait il pense qu'il serait vain d'essayer, d'autant plus qu'il arrive qu'une partie de la connaissance initiale soit compatible avec la connaissance scientifique. Ces éléments seraient à exploiter, tels les raisonnements en termes de bilan d'énergie mis en évidence avant l'enseignement de l'électricité. Quant aux raisonnements incompatibles avec la connaissance scientifique, ceux qui conduisent l'élève à des prévisions ou des justifications erronées, ou à l'impossibilité d'expliquer un phénomène, il conviendrait d'amener l'élève à une prise de conscience des limites de leur domaine de validité.

Dans tous les cas, il paraît précieux que le maître ait accès à cette connaissance initiale, qui peut lui fournir :

- soit une base de construction,
- soit les outils pour bâtir une situation problème où l'élève puisse investir ses conceptions et prendre conscience de leur insuffisance.

L'erreur établit un lien entre apprenant, savoir et maître, qui conduit le maître à

2° - Reconnaître aux élèves le droit à l'erreur

« *Tout apprentissage implique le droit à l'erreur. Construire des représentations appropriées suppose des essais qui peuvent parfois aboutir à des impasses... Les erreurs sont constitutives de la pensée qui progresse ... Les humains font d'autant plus d'erreurs que leurs capacités évolutives sont grandes.* » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p.27) Ces affirmations conduisent à penser que « *sanctionner les erreurs des élèves revient à leur interdire l'accès à la pensée scientifique* » et qu'il convient plutôt de les inciter à réfléchir à la manière dont ils raisonnent et à en rendre compte, ce qui impose de concevoir d'autres formes d'évaluation des

connaissances que celles pratiquées habituellement : en début et en cours d'apprentissage imaginer des contrôles formatifs en donnant les « règles du jeu » aux élèves, et réserver les contrôles normatifs à la fin.

3° - Simple erreur ou obstacle ?

Il est important de pouvoir prévoir le comportement d'une erreur dans la construction de la connaissance visée par l'apprentissage pour adapter la démarche à la nature de la difficulté. Le maître doit pouvoir reconnaître celles qui peuvent s'ériger en obstacle. Ce sont celles qui :

- ont un domaine d'efficacité, mais qui provoquent des erreurs spécifiques,
- représentent une connaissance stable : son rejet représente un certain « coût » pour l'élève ;
- l'obstacle ne pourra être franchi que dans des conditions spécifiques de rejet, celui-ci devenant constitutif du savoir.

Par exemple, en électricité, les concepts de circuit ou de circulation sont relativement faciles à construire tandis que celui d'intensité affronte deux obstacles :

- o le raisonnement séquentiel, qui lorsqu'il est franchi conserve toutefois la représentation d'un générateur à débit constant ;
- o le raisonnement à courant constant, raisonnement simple, qui correspond à une faible retouche des schémas précédents, qui est plus facile d'accès que le raisonnement systémique (qui exige des compétences d'un niveau cognitif élevé).

Par contre, la conservation de la charge au niveau d'un nœud, ou loi des nœuds, qui ne se révèle pas aussi intuitive que certains chercheurs l'imaginaient, est volontiers admise par l'élève.

Apprendre de ses erreurs

Dans une perspective constructiviste, les erreurs sont à considérer comme des points de départ incontournables à partir desquels l'élève apprendra. Il nous semble qu'un moyen de progrès cognitif puisse venir de la prise de conscience de nos erreurs, à condition d'avoir eu l'occasion de les identifier comme telles :

- soit en se rendant compte des incohérences ou des contradictions dans différentes démarches, ou simplement de la limitation de notre pouvoir explicatif,
- soit en se trouvant devant un conflit entre prédiction et résultat produit, par exemple dans la résolution de situations- problèmes.

En résumé, notre changement de point de vue par rapport à l'apprentissage, nous a entraîné vers d'autres pratiques pédagogiques :

- **l'enseignant** ne transmet plus un discours, il accompagne l'élève, tantôt **tuteur**, tantôt **médiateur**. Ce qui devient important ce n'est pas uniquement le contenu à transmettre mais la manière dont ce dernier est perçu par l'élève. Les situations d'enseignement deviennent des situations d'apprentissage où

- **l'élève** se doit d'être **actif** : « *il ne peut apprendre qu'en produisant, en faisant fonctionner et en faisant évoluer ses connaissances.* » G.Brousseau (1988, p.331) « *L'apprentissage passe par un temps de mise en échec des représentations qui s'avèrent insuffisantes... par un temps de doute, de déstabilisation* » (R.Charnay & M.Mante, 1990-91, p.61) ;

- l'enseignant doit « *aider l'élève à changer sa représentation de l'erreur, à prendre conscience qu'il peut apprendre de ses erreurs, et même nous enseignants, pouvons apprendre beaucoup des erreurs de nos élèves.* » (R.Charnay & M.Mante, 1990-91, p.61) ce qui oblige à diversifier les modes de contrôles, en inventer qui participent à l'apprentissage.

Ce sont autant d'aspects d'un **contrat didactique différent** de celui de l'enseignement habituel, contrat qui reste le plus souvent implicite, mais inscrit dans l'histoire scolaire de l'élève.

Il sera nécessaire d'explicitier à l'élève ce nouveau contrat : de lui expliquer quel sera son rôle, celui des contrôles, des interventions de l'enseignant pour qu'il adhère à la démarche, s'exprime, s'implique, se pose des questions, émette des hypothèses, trouve des réponses et découvre à travers ce cheminement la joie de comprendre... enfin !

4 – Analyse de propositions de didacticiens de l'électricité

4 - a – intérêt d'un enseignement qualitatif

Réflexion sur la place du formalisme dans l'enseignement de la physique au lycée

1° - La place des mathématiques dans l'enseignement actuel de la physique: M.Antoine (1982) la résume ainsi :

« Jusqu'à ces dernières années, pour les élèves des lycées l'enseignement de cette discipline était essentiellement basé sur l'établissement de lois mettant en relation numérique certaines grandeurs physiques. » Vers 1970 des activités d'éveil ont vu le jour à l'école élémentaire, suivies en 1977 d'un programme de sciences physiques dans le premier cycle du secondaire, « accordant une place prépondérante à l'expérimentation et l'investigation par les élèves eux-mêmes et ne faisant qu'un appel assez restreint au langage et à l'outil mathématique », mais sans grande influence sur l'esprit de l'enseignement à partir de la seconde. En effet, pour l'instant, d'après G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, p.62) :

« Les stratégies pédagogiques employées tendent à valoriser le formalisme mathématique dans l'accès aux concepts... ce qui revient à considérer, de manière implicite, que les élèves peuvent accéder aux concepts uniquement par un traitement des expressions symboliques... », analyse partagée par P.Bergé (1997, p.1793) :

« On considère que l'on ne peut enseigner que ce que l'on peut habiller d'un formalisme mathématique... l'évaluation du niveau de difficulté d'une notion de physique devient celui des mathématiques jugées nécessaires pour le modéliser, et non celui de la notion ou du concept lui-même. »

2° - Les effets d'un enseignement purement formel ont été relevés par de nombreux chercheurs :

« Les sujets débutants manquent de tout modèle d'explication des phénomènes. » (S.Johsua, 1982, p.93)

« La simple mémorisation d'une formule par les élèves n'implique pas nécessairement qu'ils soient capables de lui donner une signification physique. » (P.Kariotoglou, P.Koumaras et D.M.Psillos, 1995, p.73)

« Actuellement manque l'appropriation de modèles non quantitatifs » (J.L.Canal, 1996, p.232), qui ajoute (p.46) : « les formules toutes faites... deviennent des obstacles à la pensée. »

« Sans la construction des significations multiples que recouvrent ces expressions, ces dernières sont vides de sens et ne peuvent pas, bien entendu, acquérir de fonctionnalité. Ces expressions restent associées au contexte de leur introduction. L'élève est ainsi condamné à ne pouvoir les utiliser que pour résoudre des problèmes proches de ceux dont il connaît la solution. » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p.187)

« Il ne conduit pas à une réponse correcte, il sert à justifier l'erreur. Il est récupéré par le raisonnement naturel auquel il donne un vernis scientifique. » (J.L.Closset, 1983, p.93) qui ajoute (p.142) :

« le raisonnement naturel met le formalisme à son service. »

Ces remarques fournissent une idée des effets néfastes d'une approche uniquement formelle des concepts de la physique : non seulement les élèves ne disposeraient d'aucune représentation des phénomènes, mais ces formules vides de sens seraient récupérées par le raisonnement naturel qui les mettrait à son service, ce qui reviendrait à un bilan nul au niveau des apprentissages, justifiant le découragement et le désintérêt des élèves pour cette discipline incompréhensible.

J.M.Dusseau est allé plus loin que le simple constat : il a posé la question de « savoir si les mathématiques telles qu'elles sont enseignées, aident l'élève dans son activité de construction de concepts en physique » (1999, p. 7). Son analyse aboutit à la conclusion (p. 22) :

« La modélisation mathématique de la loi d'Ohm est plus un obstacle à la conceptualisation qu'un point d'ancrage. » ce qui accroît la pertinence des remarques précédentes.

Si l'approche des concepts par le formalisme constitue plus un obstacle qu'une aide pour l'élève, quels sont les outils utilisés par un expert pour résoudre une question de physique ?

3° - Quels sont les outils du physicien ? F.Langlois et J.Viard (1993) ont étudié les « raisonnements dans la résolution de problèmes d'électrocinétique par des étudiants de licence » et arrivent à la conclusion :

« en analysant ces stratégies, il apparaît que celles les plus fréquemment employées avec succès utilisent simultanément des modes de raisonnement algébrique et qualitatif. Contrairement à ce que pensent les étudiants, les raisonnements qualitatifs ne sont pas nécessairement les moins performants... le raisonnement qualitatif nécessite pour sa mise en oeuvre des bases conceptuelles solides. »

J.Piaget (1967, p.774) note le caractère premier du qualitatif sur le quantitatif :

« Le vrai physicien se méfie de tout calcul avant d'avoir compris ou entrevu le mécanisme en cause grâce à un modèle. » Ses outils formels sont pilotés par le raisonnement qualitatif.

Lors de notre étude portant sur la médiation, nous avons mis en évidence la place du langage au cours d'un apprentissage, importance soulignée également dans un article « Français et démarche expérimentale en sciences physiques » (1998) :

« La maîtrise du langage est au centre du processus d'apprentissage. Elle est un outil indispensable pour :

- communiquer...
- s'approprier des connaissances, car le passage par l'écrit structure la pensée et formalise le savoir. » Puis ils développent la place du langage à chaque étape de la démarche expérimentale.

La première phase de la résolution de problème, qui consiste à se le représenter, est par nature qualitative, même si elle est ensuite traduite par un schéma :

« L'expert traduit l'énoncé en représentations physiques. Il emploie ensuite ces représentations pour sélectionner et résoudre les équations appropriées puis pour vérifier ses résultats. Le novice passe directement de l'énoncé aux équations. » (E.Chalouhi, 1981, p.19)

« une représentation qualitative du problème est nécessaire pour le résoudre » (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997, p.18)

« Le novice, après la description initiale, commence à construire une description mathématique du problème. Il écrit des équations à partir des principes qu'il croit reliés à la situation étudiée et il essaye de résoudre le problème algébriquement.

L'expert, ne construit pas une description mathématique immédiatement après la description initiale du problème. Il construit d'abord une description qualitative et applique une méthode générale de raffinements successifs. » (L.Gomatos, 1996, p.24)

Cette analyse semble révéler qu'une science réduite à son squelette mathématique est peut-être responsable pour partie :

- du désintérêt actuellement observé :

« la greffe de la science moderne sur la culture occidentale n'a pas encore pris et c'est à cela que nous sommes confrontés lorsque nous enseignons la physique ou la chimie » F.Saint-Jalm (2001)

- et des difficultés rencontrées par nos élèves qui cherchent un moyen de réussite en se constituant un catalogue de « formules magiques » qu'ils enrichissent au fil des ans, puisque :

« si les élèves n'ont pas les relations mentales qui y sont associées, ces relations restent vides de sens. » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p.62)

Hypothèses actuelles sur la formation des concepts

Nous venons d'observer qu'un « excès de formalisme a mis la physique en compétition avec les mathématiques, et lui a fait perdre une partie de son identité propre » (M.Guiseppin, 1996, p.118) : quelle est-elle, et quelles en sont les conséquences ?

Si on considère que le concept est un objet de pensée ainsi qu'un outil pour penser et agir sur le réel « il convient d'appréhender les concepts selon trois registres :

- celui des représentations symboliques
- celui des représentations mentales
- celui du champ expérimental...

La formation de concepts nécessite l'articulation de ces trois registres. » (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993, p. 62-65)

« La compréhension d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation », sinon « le sujet opère selon une approche mono-registre qui l'empêche de détacher le signifié du signifiant qui le représente. » (J.M.Dusseau, 1999, p. 9). Il précise, à l'aide d'une analyse de G.Vergnaud (1990), une « définition pragmatique d'un concept comme un triplet de trois ensembles :

- l'ensemble des situations qui donnent un sens au concept...
- l'ensemble des invariants... (liés au concept)
- l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept... »

Ces études vont dans le sens des observations du fonctionnement de l'expert lors de résolution de problèmes : les représentations symboliques sont un « outil indispensable », pour certains le recours au « formalisme permettrait de faire des découvertes », mais « les expressions mathématiques ne constituent pas nécessairement la meilleure voie d'entrée pour accéder aux concepts. Les fameuses formules... ne suffisent pas à définir des concepts, si l'on accepte l'idée qu'un concept ne se réduit pas à une expression symbolique. » (G.Lemeignan & A.Dumas-Carré, 1993, p.187). Aussi, au moins pour la phase de découverte il semblerait qu'il y ait une place pour une physique qualitative : sans elle, pas de conceptualisation, pas de passage possible à un formalisme physique qui ait du sens s'il n'est pas piloté par une physique qualitative...

Quelle place pour une physique qualitative ?

1° - Qu'est-ce que le qualitatif en physique ? Une définition en est donnée par M. Antoine (1982) :

« Il existe une véritable physique qualitative, ou plus exactement un niveau qualitatif de la physique, base de la physique quantitative en ce sens qu'il permet de construire certains concepts fondamentaux et de réaliser une première approche opératoire de certaines grandeurs physiques... »

- *un premier aspect de cette physique qualitative utilise un langage imagé pour établir des analogies (idée développée précédemment, au cours de notre analyse préliminaire)...*
- *un deuxième aspect est le raisonnement par passage à la limite et extrapolation...*
- *un troisième domaine est fondé sur un raisonnement utilisant de manière contrôlée la logique des attributs et des relations... où commencent à s'élaborer certains concepts fondamentaux de la physique....*

Cet ensemble d'activités expérimentales et langagières aboutissent à la construction, logiquement contrôlée de véritables concepts. »

Nous partageons cette dernière affirmation et tenons à souligner l'importance du langage écrit comme parlé : depuis les travaux de J.S. Bruner (1960) et L.S. Vygotsky (1978) nous savons qu'il est structurant, crée du sens, établit des relations, participe au développement cognitif, à la compréhension.

2° - Suggestions :

Le même chercheur remarque : *« Cette première approche qualitative d'une notion physique fonctionne en fait de façon opératoire dans l'élaboration de concepts fondamentaux de la physique... le concept de résistance électrique plus ou moins grande d'un échantillon de matière mis en relation, par exemple, avec la luminosité plus ou moins grande d'une ampoule insérée dans le circuit. »*

« Dans un premier temps l'enseignement de la physique devrait être qualitatif et illustratif... Dans un deuxième temps éventuellement plus tard, (la première étape donne du sens à la seconde), il convient de formaliser... Les contrôles et examens devraient suivre la même tendance : toutes les questions devraient appeler d'abord une réponse basée sur des raisonnements qualitatifs, laissant de ce fait libre cours à l'expression d'une compréhension réelle du candidat. » (P. Bergé, 1997)

« Cette approche qualitative est indispensable pour donner du sens à un concept. Le passage par le qualitatif est un point d'ancrage nécessaire à une majorité d'élèves... »

Cette physique devrait permettre d'identifier les paramètres pertinents...

Ce serait une erreur grave de court-circuiter cette première approche... car elle permet à une majorité d'élèves de donner du sens à l'étude quantitative qui va suivre. » (M. Guisepin, 1996, p. 110)

A. Tiberghien et D.M. Psillos (1995) défendent également une modélisation qui serait dans un premier temps qualitative : *« nous soutenons qu'une première approche de la modélisation d'un phénomène devrait être qualitative. Les formules et les équations sont une forme de connaissance qui n'est pas transparente... La construction qualitative de « représentations » pourrait permettre d'aborder leurs particularités et relations qui se trouvent englobées par les « représentations » quantitatives à un plus haut niveau. Ce qui ne veut pas dire que seules les « représentations » qualitatives devraient être enseignées, mais qu'elles peuvent aider (comme les pré-concepts, telle la force électromotrice...) le questionnement de l'élève et constituer un pont pour l'élaboration des « représentations » quantitatives ensuite. »*

Pour conclure cette étude, selon la suggestion de nombreux auteurs, une approche qualitative des phénomènes peut, dans un premier temps, aider à leur modélisation. Le travail qualitatif permettrait de se représenter et de donner du sens aux concepts. En réalité, il faut avoir atteint la maîtrise du niveau qualitatif avant de passer à une représentation symbolique, puis au formalisme, ce qui constitue une étape difficile et délicate : jusqu'au niveau le plus élevé, c'est le raisonnement (qualitatif) qui pilote le formalisme.

Cette démarche nous apparaît d'autant plus fructueuse qu'elle serait celle de l'analyse d'une situation-problème par un physicien : d'abord qualitative, pour se la représenter, l'analyser. Nous avons trouvé deux intérêts potentiels à une première approche qualitative des concepts :

- une aide à leur construction et à la modélisation qui donnerait du sens aux formules ;
- un modèle de démarche, à exploiter et à expliciter en résolution de problème : commencer par se représenter la situation exposée.

4 - b – Définition d'une démarche expérimentale

Cette démarche, qui serait l'un des buts affirmés de l'enseignement scientifique, se trouvait rarement officiellement définie avant que nous n'expérimentions notre séquence :

« l'enseignement scientifique est une initiation à la démarche expérimentale au service d'une culture générale ouverte à la connaissance scientifique » (B.O., 9 mars 1995)

« L'élève doit être capable de proposer la mise en oeuvre des étapes caractéristiques de la démarche expérimentale » (Ministère de l'éducation nationale, 1991)

Nous avons retrouvé ce souci au niveau de l'expérimentation de la « main à la pâte », dont « l'une des idées-guides de la réforme serait de partir du questionnement des élèves, de leur faire apprivoiser la méthode expérimentale. » S. Tricoire (1998), ce qui nous laisse avec notre question : de quoi s'agit-il ?

Des chercheurs sont allés voir sur le terrain en quoi consistait cette démarche :

« la plupart du temps c'est à partir d'une expérience de référence, parlante et simple (en apparence), que les élèves, par une observation attentive et des mesures soignées, assistent à la mise en évidence d'une loi physique ; l'apprentissage est ensuite censé se renforcer par des expériences permettant aux élèves de répéter, de vérifier et d'appliquer. Il s'agit plus d'un apprentissage par transmission que par construction. » P. Pinelli & R. Lefèvre (1993)

Est-ce bien cela la démarche expérimentale telle qu'elle était définie et demandée par les textes en vigueur ? Dans l'affirmative, est-ce la seule qui soit envisageable ? Est-ce celle mise en oeuvre lorsqu'un scientifique cherche une réponse à une question qu'il se pose ?

Recherche d'une définition à partir des textes officiels accompagnant les programmes

1° - Le programme de la classe de seconde de nos élèves (24 septembre 1992)

Nous y trouvons pour toutes précisions :

- p. 74 *« Au travers de la démarche expérimentale, il doit former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle... Il doit montrer que cette explication cohérente est enracinée dans l'expérience. »*
- p. 82 : *« Pratique des sciences expérimentales :*
 - o *rendre compte des observations*
 - o *réaliser une expérience à partir d'une liste de consignes, d'un schéma ;*
 - o *à partir d'une expérience, d'observations ou de données se poser des questions... »*
- p. 83 : *« sensibiliser l'élève aux méthodes expérimentales en s'appuyant sur des applications attractives. »*
- p. 89 : *« Commentaires – Il est conseillé que la première activité de l'élève soit expérimentale et axée sur la mesure de tensions... Ces manipulations sont destinées à l'assimilation des lois. »*

2° - Les nouveaux programmes de 5°, 4° et 3° (CNDP, 1997-98)

Les informations suivantes, extraites des programmes de 5° & 4°, sont textuellement reprises dans les documents pour la classe de troisième :

- p. 71 : *« Les activités expérimentales en amenant les élèves à formuler des hypothèses et à les confronter aux faits, développent la pensée logique. »*
- p. 72 : *« au travers de la démarche expérimentale... »* (reprend la p. 74 du programme de seconde.)
- p. 75 : *« proposer des activités expérimentales où le respect d'un protocole est essentiel... d'autres séances mettront l'accent sur la capacité à imaginer des expériences en fonction d'un objectif et sur celle à s'organiser pour les mener à bien. »*

3° - Le nouveau programme de seconde (B.O. n°6, 1999)

Ce programme, applicable à partir de la rentrée scolaire 2000-01, contient des idées nouvelles, parmi lesquelles nous avons retenu ce qui concerne la démarche expérimentale :

- p.6 : *« L'expérimentation est une démarche essentielle des sciences. Elle consiste à imaginer, à inventer des situations permettant d'établir la réalité d'un phénomène ou d'en mesurer les paramètres... Il faut enseigner à l'élève cette démarche, en acceptant les tâtonnements, les erreurs, les approximations... L'enseignement de la démarche scientifique incluant l'apprentissage de l'observation et de l'expérience ... il faut pousser l'élève à se poser des questions et éviter de donner des réponses avant qu'il ait formulé les questions... »*

- p. 7 : « Une expérience correspond toujours à une interrogation du type : si, dans telle situation, je fais ceci, que va-t-il se passer et pourquoi ? »
- p. 8 : « La pratique expérimentale ne favorise la formation de l'esprit scientifique, que si elle est accompagnée d'une pratique du questionnement et de la modélisation. »
- p. 9 : « Les activités expérimentales offrent la possibilité de répondre à une situation-problème par la mise au point d'un protocole, la possibilité d'aller-retour entre théorie et expérience... il permet à l'élève de confronter ses représentations avec la réalité. »

La démarche expérimentale généralement employée

Il a été demandé à des professeurs-stagiaire de l'IUFM d'Aquitaine ce que l'expression « démarche expérimentale » évoque pour eux. Elle est « présentée sous la forme d'une méthode, souvent attribuée à Claude Bernard, et qui reposerait sur des étapes parfaitement codifiées à travers le schéma OHERIC (Observation – Hypothèse – Expérimentation – Résultats – Interprétation – Conclusion) ».

Dans cette méthode, l'observation des phénomènes permet de passer du monde perçu au monde pensé. C'est l'observation répétée d'un grand nombre de faits, qui induit chez le scientifique l'idée qui le conduira à l'hypothèse... Ensuite l'expérience permet de « vérifier » la théorie. Dans cette méthode expérimentale, si les résultats de l'expérience ne vérifient pas la théorie, celle-ci est abandonnée. » (A.Laugier & A.Dumon, 1998)... Plutôt qu'abandonnée, nous dirions falsifiée ce qui entraîne un retour sur les hypothèses et le plus souvent une restriction du champ de validité.

L'enseignement scientifique habituel met l'accent sur la première étape de la démarche expérimentale précédemment définie : l'observation d'un phénomène qui serait censée permettre à l'élève de valider ses connaissances. Nous avons eu l'occasion d'exposer les hypothèses actuelles sur la construction des connaissances scientifiques, ce qui nous permet d'explicitier en quoi cette démarche ne nous paraît pas satisfaisante :

- l'observation n'est pas toujours objective : il arrive que l'élève
 - o ne voit pas ce qui est inconcevable, même si le fait existe réellement ;
 - o voit ce qu'il s'attend à voir, indépendamment de l'existence réelle du fait ;
- la théorie ne peut pas être induite par l'observation : il ne suffit pas d'observer pour voir ; de plus un fait n'a pas de sens en soi, indépendamment de la question ;
- quelle est donc l'origine d'une théorie ? « Les concepts et théories doivent être librement inventés. Il n'y a pas de pont logique qui conduit du phénomène physique au principe chargé de l'expliquer. » A.Einstein (1983)
- une théorie, dont l'accès nécessite pour partie une transmission sociale (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1992), garde toujours un caractère hypothétique et il arrive qu'elle ne soit pas en accord avec les faits (T.Khun, 1983), ce n'est pas pour autant qu'elle est rejetée ou même critiquée.

Cette démarche nous paraît en contradiction avec nos connaissances actuelles de l'apprentissage, aussi allons-nous explorer d'autres propositions :

Des propositions compatibles avec nos hypothèses sur la construction des connaissances

L'élève apprendrait, en interaction avec son environnement, il construit une connaissance en réponse à une question, et G.Bachelard (1938) précise :

« Avant tout il faut savoir poser des problèmes. Et quoiqu'on en dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui porte la marque d'un véritable esprit scientifique. »

La démarche précédente ignore cette phase de construction du problème, souvent escamotée en classe, « pour ne pas perdre de temps ». Il apparaît indispensable de prendre le temps du détour pour construire le problème, étape qui semblerait essentielle pour permettre à l'élève de s'investir effectivement dans sa résolution.

Nous constatons que les nouveaux programmes prennent de plus en plus en compte des éléments de recherche en didactique. Au niveau collège ils demandent d'« amener l'élève à formuler des hypothèses et à les confronter aux faits, à imaginer des expériences. » (1997). C'est encore plus sensible au niveau lycée (1999), dont nous avons déjà cité quelques extraits et qui reprennent à leur compte d'autres éléments concernant l'apprentissage, telle la référence aux représentations, à la modélisation, à des situations-problème ou

- « éviter de donner des réponses avant qu'il ait formulé des questions...

- les activités expérimentales établissent un rapport critique avec le monde réel », ce qui évoque la mise en place d'un conflit cognitif...

P.Kariotoglou, P.Koumaras & D.M.Psillos (1995) font des remarques en accord avec les hypothèses que nous avons retenues :

« L'utilisation de faits expérimentaux susceptibles de créer un conflit cognitif est une technique puissante... si l'on veut que les élèves puissent donner du sens à des faits expérimentaux contredisant leurs idées.

Nous avons conçu une série d'expériences dont l'interprétation contredit les idées des élèves...

Nous avons terminé d'introduire un conflit cognitif chez les élèves, nous avons créé une insatisfaction face à l'incapacité de leur connaissance première à interpréter les phénomènes étudiés. La réalisation de ces contradictions facilite la construction de concepts... aptitude à interpréter de nouveaux phénomènes à l'aide de ces nouvelles propriétés. »

Des enseignants énumèrent les différentes phases de la démarche expérimentale, dans un article « Français et démarche expérimentale en physique-chimie » :

« 1 - situation problème

2 - formulation d'hypothèses

3 - vérification expérimentale des hypothèses

4 - analyse des résultats

5 - réponse au problème. » (C.Giraud, C.Ducher, B.Marty, M.Astruc & G.Rogues, 1998)

Ces étapes sont peut-être satisfaisantes, mais leur contenu reste énigmatique : la gestion différente du temps et surtout de la classe d'une manière plus générale n'apparaît pas.

P.Pinelli & R.Lefèvre (1993) décrivent la démarche mise en oeuvre par un scientifique lorsqu'il cherche une réponse à une question qu'il se pose :

« Les principales phases repérables de cette démarche sont : la formulation correcte du problème, l'émission d'hypothèses, la vérification de ces hypothèses, l'interprétation des résultats....

Une situation-problème doit proposer une tâche aux élèves à accomplir, qu'ils ne peuvent mener à bien qu'en surmontant un obstacle qui est l'objectif d'acquisition choisi... Face aux problèmes posés, l'élève est conduit à élaborer une démarche expérimentale....

La situation problème va jouer un rôle important car elle va conduire l'élève :

- à expliciter et faire fonctionner ses conceptions,
- à les modifier si l'objet résiste,
- à mesurer l'écart entre celles-ci et les faits, à fonctionner sur le mode hypothético-déductif, proche de la démarche réelle de construction du savoir en sciences,
- à élaborer pour mieux s'approprier les instruments pertinents de la résolution, donc à faire évoluer ses conceptions en étant l'acteur principal du processus d'apprentissage. »

Description d'une démarche plus actuelle

Nous avons trouvé deux chercheurs, proposant un T.P. « résolution de problème » sur l'électricité en quatrième, qui disent « avoir choisi de partir d'un montage jugé perturbateur » et explicitent les étapes de la séquence. Ce déroulement va nous aider à expliciter les étapes de notre démarche :

1° étape, individuelle :

- prendre le temps de réfléchir individuellement à la question,
- proposer des hypothèses... étape d'analyse de la situation problème

2° étape, en équipe :

- discuter au sein d'une équipe, confronter leurs propositions...
- se mettre d'accord sur une ou plusieurs propositions... étape d'émission d'hypothèses

3° étape, en groupe classe :

- discuter et argumenter toutes les propositions faites...
- prévoir un moyen de validation, c'est à dire une ou plusieurs expériences-test...

4° étape, en équipe :

- réaliser la ou les expériences... vérification expérimentale des hypothèses
- retenir la ou les bonnes hypothèses...
- conclure en formulant, avec l'aide de l'enseignant ... » (O.Soudani & M.Soudani, 1999)

Cette démarche part du questionnement de l'élève, ses représentations prennent le statut d'hypothèses à tester expérimentalement. Elle passe par les étapes de :

- proposition d'une question à laquelle l'élève va fournir une réponse à l'aide de ses représentations = **analyse de la situation-problème** ;
 - mise en commun des réponses, dont la diversité surprend, et qui leur confère le statut d'hypothèses à tester = **émission d'hypothèses** ;
 - démarche de **test d'hypothèse** = démarche de vérification expérimentale des hypothèses ;
- puis face aux observations, il nous semble assister à une accélération du temps didactique. Si l'expérience contredit les prévisions de l'élève, s'il mesure combien les faits observés sont éloignés de ses attentes, il lui faut le temps de mesurer et d'analyser les contradictions qui se trouvent à l'origine d'
- un **conflit cognitif** : peut-être peut-il le résoudre en prenant en compte les hypothèses de ses pairs, ou une information de l'enseignant, puis
 - par une démarche **hypothético-déductive** avec des aller-retour entre représentations en présence et expérience : si ... alors... tenter de valider la nouvelle représentation : retenir la ou les bonnes hypothèses, qui resteront à valider sur de nouvelles situations.

G.Bachelard avait défini la « démarche expérimentale » (1938) comme « une dialectique fine qui sans cesse va de la théorie à l'expérience pour revenir de l'expérience à l'organisation fondamentale des principes. » Ces aller-retour théorie-expérience en sont, nous semble-t-il une illustration.

Il nous restera à définir, le moment venu, notre démarche qui sera en lien avec nos hypothèses mises en oeuvre et à les tester au cours de la séquence.

Remarques

Nous ne pouvons nous empêcher de nous demander quelle est aujourd'hui la démarche expérimentale usuelle : les directives officielles sont imprégnées de didactique et conseillent une démarche interactive partant des représentations et des questions de l'élève. Quelle est la démarche proposée par les enseignants qui n'ont pas eu l'occasion de mesurer la distance entre leurs pratiques et l'enseignement souhaité par les textes officiels, où il est toujours question « de la place privilégiée accordée aux activités expérimentales »...

Cette démarche est en accord avec les nouveaux rôles du maître, tantôt tuteur, tantôt médiateur, ce qui correspond à une **nouvelle gestion du groupe classe**, dans une logique de temps différente, qui doit laisser à l'élève le temps de s'exprimer et où il n'y aurait plus, idéalement, aucun élève laissé pour compte.

Dans l'analyse qui précède, nous n'avons pas relevé la place primordiale, pour ne pas dire le rôle unique accordé aux mesures dans les activités expérimentales, par le Bulletin Officiel de l'Education Nationale (1992), textes en vigueur lors de l'expérimentation de la séquence : nous aurons l'occasion d'y revenir pour préciser la place que nous lui accordons. Disons seulement que la **place prépondérante accordée à la mesure** était liée à celle de l'observation, et reposait « *sur la croyance que l'observation et la mesure sont à la base de la « mise en évidence » des lois physiques* » conformément à l'idéologie inductiviste. (P.Pinelli et R.Lefèvre, 1993)

Nous voudrions que l'expression « démarche expérimentale », ou « méthode expérimentale », ou encore « méthode scientifique » ne reste pas attachée à la seule expérience. Elle peut aussi être utilisée en **résolution de problème en classe**, dont le rôle complète celui de l'expérience. Cette activité est souvent utilisée pour apprendre à se servir du caractère prédictif et opératoire des modèles, diversifier l'emploi des propriétés d'un concept, et donc dans ce cas la démarche passe par la mise en oeuvre de toutes les étapes énumérées, à l'exception du conflit cognitif. Les propriétés des concepts permettent de fournir une réponse acceptable à la question... (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997)

Nous avons eu l'occasion d'insister sur la nature hypothétique de la connaissance scientifique ; cet aspect se retrouve dans la démarche scientifique « dont une des bases est le doute » Cl.Bernard Nous partageons le souhait exprimé par le B.O.E.N. (1999), à savoir que les acquis scolaires aient un retentissement positif dans la vie quotidienne :

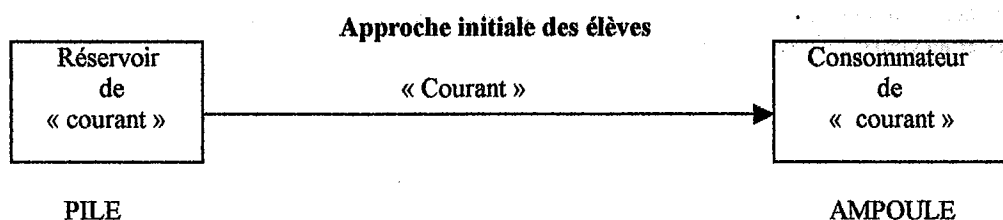
« l'enseignement doit sensibiliser les élèves aux sujets en liaison avec l'actualité scientifique... tout en leur apprenant à prendre leurs distances par rapport aux informations qu'ils reçoivent (en particulier démystifier les fausses sciences). »

Face à une information surprenante et présentée comme une vérité absolue, non discutable... notre démarche portera ses fruits si l'élève met en oeuvre une dynamique intellectuelle qui traite ces informations comme des hypothèses à mettre à l'épreuve d'expériences intellectuelles. Ces élèves ne seront pas passés à travers les activités scientifiques sans rien apprendre...

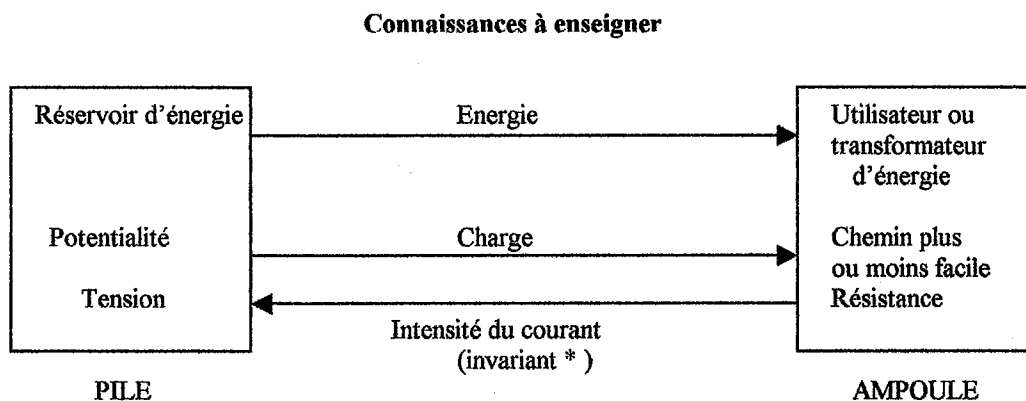
4 - c – Une introduction indépendante des concepts ?

L'étude des représentations a mis en évidence que « *le raisonnement naturel en électrocinétique est un raisonnement mono-notionnel, la notion de cause étant évoquée le plus souvent sous le nom de « courant », « d'électricité », ou « d'énergie ».* » (J.L.Closset, 1983, p.237) Les élèves pensent que ce « courant » qui existe dans la pile est consommé dans l'ampoule. Le rôle de la pile est de fournir un courant constant dans le circuit, au moins tant que la « tension » reste constante à ses bornes.

Pour permettre aux élèves de prédire correctement, de décrire et d'interpréter les phénomènes relatifs aux circuits électriques simples, il s'agit de leur apprendre à différencier les grandeurs énergie, différence de potentiel et intensité du courant : « *nous devons prendre en compte leur approche initiale, qui utilise majoritairement une seule notion possédant des propriétés fluctuantes. Comme, suivant les circuits, ces propriétés peuvent être compatibles avec celles de certaines grandeurs physiques, elles permettent donc à l'élève de maintenir une indifférenciation. Par exemple, le courant tel que le conçoit l'élève peut, suivant les situations, être stocké dans la pile, se conserver le long du circuit, ou être usé au niveau de l'ampoule.* » (A.Tiberghien, G.Arsac & M.Méheut, 1994) Ces auteurs illustrent par le schéma suivant le but de l'enseignement du point de vue des connaissances à acquérir :



Cette approche est compatible avec un raisonnement séquentiel. Elle est parente d'un raisonnement unipolaire où, comme le fait remarquer J.L.Closset (1983, p.239), la fermeture du circuit n'est pas nécessaire. Le fonctionnement du circuit est décrit à l'aide d'une seule notion.



(*) A ce schéma reproduit des auteurs nous voudrions ajouter la précision suivante : l'intensité du courant n'est un invariant que si on ne modifie en rien le circuit (en référence à la ténacité de la représentation à débit constant)

Le circuit est à considérer dans sa globalité : c'est une boucle fermée, constituée d'éléments en interaction. Ce système en équilibre se décrit à l'aide de plusieurs concepts.

P.Kariotoglou, P.Koumaras & D.M.Psillos (1995) se sont intéressés à une « différenciation conceptuelle » lors d'un enseignement d'hydrostatique. Nous y avons trouvé des remarques, qui peuvent, nous semble-t-il, se transposer en électrocinétique :

« *A la suite de l'analyse faite ci-dessus du modèle des élèves et du modèle scientifique, il apparaît que les élèves utilisent une notion générale pour interpréter... à la place de deux concepts, séparés mais reliés... L'acquisition de la connaissance scientifique implique donc un changement dans la connaissance initiale des élèves, qui comprend la désintégration de la notion... et le développement de deux notions...* »

De même, A.Tiberghien (1998), au sujet de l'enseignement de l'énergie, écrit que son apprentissage se pose en terme de **différenciation de concepts** : « *Nous avons choisi de présenter l'énergie par ses trois propriétés essentielles, stockage, transformation et transfert... Ces propriétés permettent de mettre en oeuvre le principe de conservation quand différents domaines interviennent. Cette présentation permet de différencier le courant électrique fondé sur la conservation des charges, de l'énergie : ainsi dans le cas de la situation pile-ampoule, le courant retourne au générateur alors que l'énergie va dans le réservoir environnement.* »

Cette différenciation, jugée nécessaire, conduit à introduire de nouveaux concepts. P.Kariotoglou, P.Koumaras & D.M.Psillos (1995) précisent

« *qu'un concept devrait être introduit comme une grandeur physique primaire, sa définition basée uniquement sur ses propriétés... L'usage d'une définition mathématique au travers d'une formule voudrait dire que le concept est défini en relation avec d'autres quantités, c'est à dire qu'il est une grandeur dérivée.* »

Cette idée se trouvait déjà chez D.Psillos, P.Koumaras & A.Tiberghien (1988), qui observant le raisonnement mono-notionnel des élèves où courant = énergie et l'absence de nécessité pour eux des deux variables U et I, remarquent qu'habituellement la différence de potentiel est introduite en relation avec d'autres variables ce qui serait source de confusions. Un seul concept peut permettre, dans un premier temps, des prédictions et des explications correctes : la différence de potentiel, à introduire comme concept premier : c'est une caractéristique de la pile, une variable qui décrit l'état de la pile, qui indique la tendance, la disposition de la pile à établir un flux de quelque chose appelé courant.

Ce choix semble trouver un large consensus pour ce qui concerne ce concept inutile pour l'élève : la différence de potentiel. Nous l'avons rencontré chez :

- A.Tiberghien (1993) « *la représentation causale simple « une d.d.p. provoque un courant » paraît s'imposer au moins dans un premier temps si l'on veut donner corps à la notion de d.d.p. elle-même* »

- A.Tiberghien (1994) « *la pile est la cause de l'allumage de l'ampoule* »

- S.Johsua (1993) « *le rôle causal de la f.e.m.* »

- A.Tiberghien, D.Psillos & P.Koumaras (1995), écrivent : « *chaque concept est introduit comme premier* », avec une référence directe aux objets, aux événements. Cette approche est radicalement différente de celle, traditionnelle dans laquelle ils sont introduits par des relations mathématiques :

- la d.d.p. est reliée aux caractéristiques visibles de la pile, et à la possibilité d'établir un « courant dans un circuit » ;
- l'énergie est reliée au volume de la pile dans la mesure où elle constitue une réserve d'énergie, mais aussi à la durée de fonctionnement du circuit ;
- le « courant », médiateur de l'interaction électrique acquiert plusieurs propriétés : les élèves savent que quelque chose se transfère de la pile à l'ampoule, c'est l'énergie à différencier du courant qui a la propriété de s'écouler dans une direction et de se conserver le long du circuit ;
- ces connaissances sont réinvesties dans le concept de résistance qui possède un effet thermique et qui est un régulateur du débit, il agit sur l'intensité du courant ;
- la lampe a aussi ces deux rôles : elle utilise de l'énergie, en lien avec l'idée première des élèves, et constitue un chemin pour le courant, c'est pourquoi le chapitre sur le courant précède celui sur la résistance.

Seul J.L.Canal (1996, p.36) pense le contraire et fait le choix d'une approche globale, car, écrit-il :

« *Le circuit électrique forme un tout où chaque élément interagit avec les autres. Aussi nous semble-t-il souhaitable de construire les trois grandeurs tension, courant et résistance simultanément et en interaction plutôt que séquentiellement.* » Pourtant il cite Pascal : « *Je tiens pour impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties* » ce qui laisse penser que ces deux approches ne s'excluent pas, mais se complètent.

En effet, après une approche indépendante, qui contribue à donner du sens à chaque concept, nous aurons à les mettre en relation. G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, pp.14-15) nous rappellent « *que quelque soit le modèle que l'on envisage, il prend en compte tout un réseau conceptuel... La pensée procède par mise en relation. Il vaut mieux aider à ces mises en relation plutôt que de présenter des concepts isolés du réseau conceptuel qui leur donne sens* »... sinon « *les élèves seraient dessaisis de leur capacité de comprendre.* »

Nous verrons que, suite à cette analyse nous avons fait le choix d'une introduction initialement indépendante des concepts afin de donner du sens à chacun pour lui-même, d'aider l'élève à s'en construire une représentation avant de les mettre en relation, ce qui enrichira chacun des concepts reliés.

Cette différenciation courant-énergie conduit à introduire le concept d'énergie :

4 - d – Faut-il aborder l'aspect énergétique ?

Son existence dans les représentations des élèves

Les représentations initiales des élèves utilisent la notion de « courant » ayant les propriétés d'un « fluide énergétique », dont les « caractéristiques énergétiques sont dominantes » (J.L.Closset, 1983, p.205), puis, p.235 : « Une des caractéristiques des raisonnements à propos de l'électricité est qu'ils ont tendance à se faire en termes d'énergie ... »

On s'évertue, avec l'insuccès que l'on sait, à introduire le concept d'intensité de courant...

Ceci crée rapidement un dialogue de sourd entre enseignants et enseignés. Les uns parlent d'intensité de courant, en pensant à un flux... les autres qui pensent à l'électricité surtout en termes d'énergie, entendent parler de courant et reconnaissent sous ce vocable la notion aux propriétés énergétiques marquées dont ils se servaient jusqu'alors pour décrire les phénomènes électriques. »

Cette remarque, qui donne un exemple de la part d'implicite dans l'enseignement, tend à montrer qu'il est source d'incompréhension et de quiproquos, d'où, nous semble-t-il, l'intérêt d'aborder l'aspect énergétique :

La nécessité d'aborder l'aspect énergétique du circuit

Lorsque l'élève arrive en classe avec une question, il nous semble que l'enseignant intéressera d'autant plus l'élève et l'aidera à progresser s'il apporte une réponse à sa question.

Or il semblerait à la lecture de J.L.Closset (1983, p.191 et suivantes), lors d'expérimentations avec un fer à repasser, qu'à une question mécaniste de type :

« comment ça marche ? », la seule perception qu'ils en aient soit en termes d'énergie, mais avec leur énergie à eux, substantialisée. La question de l'élève semblerait être :

« Comment y a-t-il de l'énergie dans la pile et comment se retrouve-t-elle dans la lampe ? »

On peut imaginer que l'élève attendant une réponse à sa question, pense que le maître la lui fournit quand il parle de courant, et pour l'élève, courant et énergie seraient deux termes équivalents. Ce « courant énergétique » irait de la pile vers l'ampoule par les tuyaux que sont les fils, puis dans l'ampoule où il s'userait, ce qui donnerait une forme de raisonnement séquentiel avec usure du courant.

Ce raisonnement de type causal linéaire leur est familier : pour l'éviter, nous pensons qu'il faut répondre à leur question, au comment ça marche en termes d'énergie. C'est ce que conseille J.L.Closset (1983, p.232) : « raisonner en termes de bilan d'énergie est une base favorable à exploiter... La démarche consistant non à détruire les représentations, mais à s'appuyer dessus pour construire l'apprentissage. »

Nous avons déjà rencontré cette proposition chez d'autres chercheurs, tels A.Tiberghien(1994), D.M.Psillos (1995) ou J.L.Canal (1996, p. 83-86) qui parle d' « une gageure des apprentissages actuels : apprendre l'électricité en ignorant l'énergie... Le circuit électrique est avant tout le siège d'un échange d'énergie entre un lieu qui en tient en réserve vers un lieu qui est susceptible de l'utiliser... le circuit serait le siège d'un transfert d'énergie d'un site producteur vers un ou plusieurs sites consommateurs... »

Ce concept est complexe mais diverses études ont montré qu'une simple approche consumériste de l'énergie était suffisante » car si le concept est délicat, il est pressenti par les élèves et appartient à leurs représentations.

Comment l'introduire ?

Nous avons relevé, lors de l'analyse de l'approche des concepts de l'électricité (§ 4 - c -), des propositions de chercheurs visant à **différencier les grandeurs énergie et courant**. Cette idée se trouve aussi explicitée par M.Summers, C.Kruger & J.Mant (1998) qui expliquent que les élèves ont l'idée intuitive que quelque chose est utilisé dans le circuit. Cette notion est correcte mais c'est l'énergie qui est transférée de la pile à la lampe et qui est consommée, pas le courant, constitué d'électrons en mouvement : le courant, les électrons ne sont pas consommés. La lampe est un consommateur d'énergie. Il apparaît la nécessité de faire la distinction entre :

- la conservation du courant, de la charge et
- le transfert et la consommation de l'énergie.

De leur côté, J.J.Dupin & S.Johsua (1986) relèvent que « les notions de courant, d'énergie et même peut-être de tension, apparaissent comme très peu différenciées, et cela jusqu'en seconde... Des résidus de cette non différenciation sont aisément repérables au niveau universitaire. »

Cette remarque, associée à l'idée qu'un concept n'existe jamais seul, conduit à envisager des relations avec un autre concept : **pourquoi ne pas associer le concept d'énergie à celui de différence de potentiel ou de force électromotrice ?** Cette idée se rencontre chez J.L. Canal (1996, p. 237-39) :

« La tension à vide d'un générateur ou f.e.m. correspond à la « pression » qui s'exerce de part et d'autre des deux pôles du générateur, valeur que l'on retrouve aux bornes de l'interrupteur ouvert. En négligeant les effets de la résistance interne du générateur, cette tension est égale à la tension en charge qui correspond à l'énergie transférée par unité de charge du générateur au reste du circuit ;

La chute de tension entre deux points d'un circuit fermé, c'est l'énergie électrique consommée entre les deux points par unité de charge qui la traverse... »

Ainsi la tension se trouve liée à l'énergie et à la force électromotrice que nous pouvons nous représenter comme la force avec laquelle la pile met les électrons en mouvement.

Cette approche nous paraît présenter de nombreux intérêts :

- s'appuyer sur la représentation de départ des élèves, d'un courant qui s'use pour rendre compte de l'aspect énergétique qu'ils soupçonnent, et ainsi de tenter de fournir une réponse à leurs questions ;
- de dissocier le courant de l'énergie, ce qui se trouve résumé par R. Millar (1993, p. 352) :
« l'énergie est transférée à partir de la source dans une direction et consommée. Au contraire le courant qui transfère cette énergie est conservé. »
- et d'établir un lien entre l'existence d'un échange énergétique et celui d'une différence de potentiel (à l'origine d'une énergie potentielle) ou d'une force électromotrice.

4 - e – Le schéma électrique

Pour l'expert il peut avoir un « effet facilitateur » (S. Johsua, 1982), alors que pour l'élève il peut être source d'erreur : nous allons essayer de mieux en comprendre la nature afin de faciliter sa maîtrise par l'élève ; qu'il devienne, pour lui aussi, un outil efficace.

Importance du schéma en électricité

L'activité de résolution de problème nécessite souvent un schéma qui peut faire partie des données ou être à tracer à partir du texte :

« à partir de l'énoncé initial du problème, l'expert traduit le problème en un schéma » (E. Chalouhi, 1981), idée qui se retrouve développée par R. Charney & M. Mante (1990-91) qui précisent :

« La lecture de l'énoncé implique une activité de déchiffrement du texte et une activité de sélection, de codage et de stockage de l'information pertinente. »

En électricité, l'élève qui aborde un exercice commence par interpréter un schéma ou traduire l'énoncé par un schéma, mais il peut avoir comme caractéristiques de la connaissance des indices non pertinents : alors la première étape de la résolution peut introduire une erreur de déchiffrement du schéma ou de codage du texte dans ce qui devient une mémoire externe à l'origine de la recherche d'une solution, car le schéma :

« permet d'organiser et de regrouper dans une vue d'ensemble des données et des relations d'un montage électrique, tout en gardant un pied dans le concret. » (S. Johsua, 1982)... alors que l'autre se situe au niveau des concepts :

« le schéma électrique est une forme particulière de langage graphique... est un intermédiaire conceptuel, qui a donc des relations constitutives avec les concepts de l'électrocinétique (particulièrement ceux de courant et de potentiel). » (S. Johsua & J.J. Dupin, 1993 ; p.316)

Ainsi l'activité de codage ou de déchiffrement ne consiste pas en une simple activité d'écriture ou de lecture, mais requiert d'autres facultés cognitives :

Connaissances nécessaires à la maîtrise du schéma électrique

Une première connaissance se situerait au niveau de la maîtrise des concepts :

« Lire un schéma électrique et le décoder requiert d'un étudiant une série de capacités perceptives... étroitement reliées à la compréhension de concepts de base en électricité comme ceux de courant et de tension » (M. Cailliot, 1984), idée ré-exprimée par S. Johsua :

« La lecture et l'utilisation des schémas électriques supposent – au moins – l'utilisation combinée des notions d'intensité de courant et de celle de potentiel électrique » (S. Johsua, 1985 ; E, p.1)

Une autre connaissance s'avère précieuse dans l'activité de décodage: « *une faiblesse dans l'analyse du circuit conduit à une solution erronée. Les erreurs principales proviennent de certaines configurations spécifiques des résistors, alignement ou parallélisme.* » (M.Caillot, 1984)

D'un point de vue physique, le schéma montre que les composants sont reliés, et comment ils le sont, autrement dit suivant quelle **topologie**. Mais l'expert ne fait pas une analyse géométrique du schéma, il est attentif aux conventions de codage en lien avec les concepts. Ainsi, pour lui :

- un **nœud** est une zone équipotentielle ;
- un **trait** relie des points au même potentiel : au bornes d'un trait il n'y a pas de d.d.p. (au contraire, lors de la réalisation d'un montage, qui est quasi identique au schéma, en lieu et place du trait c'est un fil, conducteur résistant. Par convention, on admet que les points reliés par un fil sont au même potentiel.)

On est autorisé à agir sur le processus de schématisation d'un montage réel, de manière à préférer, telle ou telle schématisation plus simple, ou plus claire, ce qui permet de comprendre qu'un même montage puisse avoir des schématisations différentes.

Comment le schéma peut être source d'erreurs pour l'élève ?

Nous avons observé (M.F. Missonnier, 1996) des difficultés à différents niveaux, certaines ne demandant qu'un simple éclaircissement :

- certains élèves ont une difficulté à accepter certaines schématisations d'un même montage : « *comme il garde un pied dans le concret, il peut avoir tendance à être considéré comme une image, une figuration directe de la réalité.* » (S.Johsua, 1982) ;
 - nous avons observé une confusion au niveau de l'interrupteur ouvert ou fermé. L'élève qui raisonne en termes de courant, fluide énergétique, reconnaît dans l'interrupteur le robinet qui commande l'ouverture ou la fermeture du débit, par exemple lorsqu'il est fermé arrêt du débit. Même en leur fournissant texte et schéma, les confusions subsistent à l'entrée en seconde ;
- alors que d'autres, venant d'un défaut de mise en oeuvre des concepts lors de la lecture du schéma, nécessitent un travail de remédiation plus important :
- « *une perception du circuit... consiste à prendre surtout en compte les conséquences de la topologie particulière de ce circuit* » (J.L.Closset, 1983 ; p. 196) ce qui conduit à des « *aspects perceptifs différents suivant les différentes schématisations possibles d'un même réseau électrique* » (S.Johsua, 1982) ce qui se trouve expliqué par M.Caillot (1984) : les élèves qui se trompent « *utilisent principalement des traits perceptifs de surface... par exemple, les caractéristiques géométriques sont décisives ... la configuration du positionnement des résistors revêt une importance certaine :* »
 - o tous les résistors apparaissant sur une même ligne sont considérés comme étant en série (même si un nœud existe entre eux),
 - o les résistors qui apparaissent dans des branches géométriquement parallèles sont en dérivation (même si par exemple, une des branches contient un générateur). »

Différents travaux tendent à montrer que cette dernière source d'erreur, observée à l'entrée en seconde, persisterait au niveau universitaire, par exemple : « *Une grande majorité d'étudiants utilisent « un raisonnement en courant »... la similitude des situations n'est pas reconnue... Le raisonnement en termes de d.d.p. n'est présent que pour une minorité d'étudiants de maîtrise de physique. Il est quasiment absent pour les autres niveaux considérés.* » (S.Johsua, 1985 ; E, p.31)

Idées de remédiation

Une lecture électrique et non géométrique du schéma, associée à des représentations diversifiées d'un même montage, nous sont proposées par divers chercheurs :

1° parallélisme électrique et parallélisme géométrique : M.Caillot (1984) a observé que les élèves, qui savent reconnaître parmi un choix de schémas ceux qui représentent un même circuit, avancent des arguments qui révèlent une utilisation correcte de principes physiques. Comment entraîner l'élève à suivre une telle démarche ? R.Millar (1993), observant la difficulté de reconnaître des circuits similaires, invite à considérer :

- deux résistances en série comme des diviseurs de tension ;
- de simples circuits en parallèle comme un ensemble de circuits simples combinés.

Cette approche du schéma n'est plus la lecture géométrique spontanée de l'élève, c'est une lecture électrique, qui passe par les concepts du physicien, qui privilégie en particulier un raisonnement en termes de d.d.p., ce qui pourrait contribuer à donner du sens à ce concept. En effet, les études des représentations ont

montré « un concept de potentiel dépourvu de contenu physique... ce qui produit des difficultés spécifiques dans la lecture des schémas électriques. » (S.Johsua & J.J.Dupin, 1993 ; p.316)

2° Une autre cause d'erreur serait, d'après M.Caillot, l'établissement de **schémas canoniques** : « alignement ou parallélisme... ces deux configurations sont très proches des schémas canoniques largement utilisés en classe... » Nous avons demandé à des professeurs stagiaires d'IUFM. de dessiner un circuit comportant un générateur et

- deux dipôles en série : ils étaient alignés à une exception près,
- deux dipôles en dérivation : ils étaient tous géométriquement parallèles.

Cette observation confirme l'existence de tels modèles chez de futurs enseignants, qui sont prêts à être transmis aux élèves... Or « Ces circuits canoniques jouent le rôle de prototypes des concepts de « en série » et de « en parallèle ». Une figuration plus ou moins similaire à un prototype affecte alors profondément la réponse du novice. » (M.Caillot, 1984) Aussi, lorsque deux résistances en série sont géométriquement dessinées en parallèle, il apparaît dans la tête de l'élève, ce que J.M.Dusseau (1999, pp. 10-11) appelle « une contagion de signifiant ».

Ce constat conduit à envisager deux remèdes complémentaires :

- une diversification de la représentation géométrique d'un même branchement :
 - des dipôles en série peuvent être dessinés géométriquement parallèles,
 - des dipôles en dérivation peuvent se trouver dessinés alignés, afin que l'élève se trouve d'autres critères de lecture que ceux de la géométrie ;
- habituer l'élève à fournir des représentations variées d'un même montage et à en faire une lecture électrique ; puis réinvestir ces connaissances sur les montages mixtes.

Une meilleure lecture du schéma, nous apparaît essentielle puisque « cette compréhension est une condition pour aborder avec succès des problèmes en électricité. Elle conditionne la capacité à produire une représentation correcte du problème ; en son absence, la solution du problème sera incorrecte. » (M.Caillot, 1984)

4 - f – Le circuit électrique, système en interaction

Rappels

1° – Les raisonnements des élèves

- les représentations des élèves

Nous avons déjà décrit les trois modes principaux de raisonnement empruntés par les élèves, en dehors du raisonnement correct, à propos des circuits électriques. Ils considèrent que l'effet d'une résistance sur la circulation du courant :

- est limitée à l'intérieur de celle-ci, raisonnement appelé local, ou
- se poursuit en aval, sans effet en amont, raisonnement appelé séquentiel, ou
- qu'elle ne modifie pas le débit. Ce raisonnement dit « à courant constant » présente pour l'élève de nombreux avantages :
 - il respecte la conservation du débit en tout point d'un circuit série et
 - il permet des prévisions simples et rapides, car sans calcul ou référence à un autre concept.

Remarques : au travers de ces raisonnements perdure la représentation d'un générateur dont la caractéristique serait de débiter la même intensité quelque soit le circuit : J.J.Dupin & S.Johsua (1986, p.798) parlent de la « caractéristique principale de la pile définie par le courant qu'elle délivre... considérée comme une grandeur invariante et fondamentale. »

Cette représentation est commune à tous les raisonnements non systémiques : ils nient l'influence mutuelle permanente de tous les éléments d'un circuit.

L'élève centre son attention sur un élément du circuit sans jamais l'appréhender dans sa globalité. Cette **vision morcelée** pilote les raisonnements qui attribuent un rôle à la pile d'une part, à la résistance d'autre part (avec un regard local plus ou moins étendu). Cette dichotomie correspondrait à la démarche historique :

« Les physiciens ont d'abord décomposé le circuit en deux parties... Cette démarche a été un obstacle épistémologique à l'établissement des règles de l'électrocinétique. Ce ne sont que les travaux d'Ohm et de Pouillet en montrant l'interaction entre la tension et l'intensité et en considérant le circuit comme un système qui permirent de surmonter cet obstacle... Elèves et physiciens ont un type de démarche en commun qui est de découper les circuits en parties indépendantes les unes des autres pour pouvoir les étudier séparément. Ce type de raisonnement empêche la mise en évidence des inter - relations entre les différents éléments. » (F.Audigier & P.Fillon, 1992, pp. 222-23)

- le raisonnement causal linéaire

Dans cette représentation, étudiée en thermodynamique par S.Rozier (1988), un système d'éléments A, B, C... en interactions mutuelles simultanées est analysée à l'aide d'une chaîne causale linéaire : A agit sur B, qui à son tour agit sur C... qui n'agit pas sur A. Ce mode de raisonnement, ignore le concept d'interaction, qui se trouve remplacé par la **relation agent – patient**. Il est très usité, et se rencontre par exemple :

- en mécanique, avec les forces où seule celle dont l'effet est sensible sera prise en compte (L.Viennot, 1996),
- en chimie, avec « l'attaque des métaux par les acides », où seul le métal subit une transformation sensible : il disparaît, tandis que l'acide est inchangé (M.Méheut) ou
- en électricité où J.L.Closset (1983) lui a donné le nom de raisonnement séquentiel.

D.M.Psillos (1997) explicite différentes modalités de la relation agent – patient en électricité :

« ces modèles comportent un agent, un patient et souvent un médiateur de l'action causale »

Nous avons rencontré deux modes de raisonnement. Le plus fréquent universellement décrit :

« l'agent donne du courant au patient qui l'utilise... L'agent causal est la pile qui donne quelque chose – courant ou énergie – aux lampes qui sont les patients. Courant ou énergie sont le médiateur de l'action causale. » Dans cette représentation, la pile est à débit constant.

Pour quelques élèves, c'est la lampe qui demande ce dont elle a besoin à la pile pour fonctionner, c'est elle qui contrôle l'action, l'approvisionnement par la pile est variable. Dans ce modèle **la lampe est l'agent et la pile le patient**.

Dans tous les cas, pour l'élève, le raisonnement porte sur des objets alors que pour le physicien il porte sur des grandeurs physiques.

2 ° - Les effets de l'enseignement usuel

Notre analyse de l'enseignement habituel tend à montrer qu'il transmet essentiellement un formalisme, atteint à partir de mesures, où pour l'élève la loi d'Ohm se résume à une **formule**, relation entre trois lettres : les élèves auront à rechercher la valeur prise par l'inconnue connaissant la valeur attribuée aux deux autres... exercice mathématique d'application numérique... dépourvu de tout intérêt physique.

Ignorant que l'élève aborde cette loi avec une quelconque « connaissance » l'enseignant ne s'en préoccupe pas et l'élève conserve ses représentations que des chercheurs comme J.L.Closset(1983) ou S.Johsua (1985) retrouveront intactes au niveau universitaire.

De plus, calculs ou mesures seront à effectuer par l'élève sur un circuit donné, où tout reste **stationnaire**, ou sur un schéma où tout est fixé, or : « la représentation à débit constant est parfaitement efficace dans l'analyse d'un circuit pris en tant que tel, puisque toutes les grandeurs y sont stationnaires, ce qui représente la grande majorité des problèmes proposés aux élèves. » (J.J.Dupin & S.Johsua, 1986 ; p.799)

J.L.Closset avait déjà remarqué que l'enseignement usuel « renforce le raisonnement séquentiel » (1983, p.209). Notre analyse tendrait à montrer qu'il pourrait en être de même pour le raisonnement à courant constant. Ignorant les représentations des élèves, non seulement l'enseignement ne prend pas les moyens de les ébranler, mais il court le risque de les **renforcer**.

Il semblerait que l'enseignement usuel permette à l'élève de conserver, si ce n'est pas de renforcer, ses représentations.

3 ° - Cet apprentissage met plusieurs concepts en présence

- le concept de circuit

Pour percevoir le circuit comme un système, il faut déjà posséder une perception de l'ensemble de ce qui constitue le circuit, or nous venons de décrire le regard local de l'élève qui prend en compte d'un côté la résistance qui freine ici, et par ailleurs la pile dont le débit reste constant. Comme l'écrit J.L.Closset (1989) :

« La notion même de circuit est absente de leurs préoccupations. »

Ce concept semble le premier à bâtir, si on veut tendre vers une vision plus élargie des relations qui peuvent exister entre ses constituants, puis entre les grandeurs physiques nécessaires à sa description.

- le concept de système

Si le mot circuit appartient au vocabulaire usuel et peut être illustré pour celui des 24 heures du Mans, ou celui parcouru par leur train électrique... le mot système se rencontre dans différents domaines (mathématiques, économie, philosophie...). Pour la physique une définition nous est fournie par G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, p.56) :

« Un système est défini par un ensemble d'objets et par un jeu de grandeurs physiques qui le décrivent ; chaque état est défini par un ensemble de valeurs de ces grandeurs... Le système est donc une construction intellectuelle du physicien qui a toute liberté quant aux regroupements d'objets qu'il peut faire. »

- le concept d'interaction (d'après G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993 ; p.37)

Dès que deux systèmes entretiennent entre eux une quelconque relation, dès qu'ils exercent entre eux une quelconque influence, ces influences mutuelles (A agit sur B et dans le même temps B agit sur A) sont nommées interactions. Ces interactions mutuelles aboutissent souvent à un état d'équilibre. En électricité, si une pile permet d'allumer une ampoule (la pile agit sur la lampe, dans le même temps, la lampe agit sur la pile), pile et ampoule sont deux objets en interaction. Leur influence mutuelle impose la d.d.p. à leurs bornes, le débit de courant qui les traverse... qui correspond à l'état stationnaire qui fera l'objet de mesures pour les élèves...

Comment ébranler le raisonnement à courant constant ?

1° - Constat

« Il semblerait que plus on s'élève dans le niveau de formation, plus on adopterait un raisonnement à courant constant. » (S.Johsua, 1982) mais arrivé à ce stade... « Il semble que le raisonnement à débit constant est une difficulté majeure ... il y a là un véritable obstacle épistémologique » (S.Johsua, 1985 ; E, p.7)

Connaissant le mode préférentiel de raisonnement de l'élève, le raisonnement causal linéaire à une variable, des résistances fortes du fonctionnement cognitif semblent prévisibles. Le raisonnement systémique qui met en jeu de nombreux concepts et oblige à raisonner à plusieurs variables quand l'enseignement des mathématiques est centré sur les fonctions à une variable (L.Viennot, 1993) apparaît comme un saut cognitif important : « le passage au raisonnement systémique pourrait apparaître comme un obstacle épistémologique nécessitant un saut cognitif important. » (J.L.Closset, 2000)

Après ces analyses, comment faire prendre conscience à l'élève « que les actions locales dans un circuit électrique ont un effet global, que la structure du circuit électrique est systémique ? » (J.L.Closset, 1983 ; p.43)

2° - Propositions retenues :

- faire évoluer le circuit

Si rien n'évolue dans un circuit, les grandeurs y sont stationnaires et le raisonnement à débit constant permet des prévisions correctes : il vient à l'idée de faire varier le courant débité par la pile, par exemple avec des résistances variables... idée confortée par une étude de P.Koumaras, P.Kariotoglou & D.M.Psillos (1994) qui posaient la question :

« devons nous utiliser des activités évolutives en introduction à l'étude de l'électricité ? Le cas de la résistance. » et voici des extraits de la conclusion :

« Les élèves ont été capable de répondre à des questions liées à des états stationnaires... ils n'ont pas pu appliquer leurs conceptions intuitives pour interpréter des phénomènes évolutifs, dans la mesure où les résultats expérimentaux allaient à l'encontre de leurs intuitions au niveau des règles causales de base. De telles questions sur des phénomènes évolutifs semblent aider les élèves à délaisser leur conception naïve... La combinaison d'expériences sur des états stationnaires et des phénomènes évolutifs pourrait élargir le champ expérimental et permettre l'adaptation du savoir enseigné au raisonnement de l'élève. »

Les observations des élèves peuvent être source d'un conflit cognitif et les mettre en quête d'explications : « Comment la pile le sait ? » m'a-t-il été demandé...

- relier les deux formes de raisonnement causal

La réponse nécessite « une évolution nécessaire est bien radicale, car elle porte sur le fonctionnement de la causalité, interne au modèle qui exige de considérer simultanément l'ensemble du circuit et non l'action d'un objet sur un autre. Elle nécessite de prendre en compte plusieurs grandeurs physiques simultanément ce qui est difficile et ne se trouve pas spontanément chez les élèves avant enseignement. » (A.Tiberghien, G.Arsac & M.Méheut, 1994).

On peut imaginer un début d'explication illustrée à l'aide de l'analogie de la chaîne de vélo, mais surtout compléter par l'exploitation des deux raisonnements présents, à relier comme le suggèrent P.Koumaras, P.Kariotoglou & D.M.Psillos (1997) en une « causalité bouclée ». Ils proposent d'utiliser les deux modèles de raisonnement causal, celui de la pile qui donne, et celui de la lampe qui prend, au lieu d'un seul, ce qui constituerait un modèle énergétique du circuit électrique, où le médiateur aurait un rôle de transfert. Le raisonnement causal initial de l'élève se faisait dans une seule direction, de l'agent vers le patient. En prenant en compte le raisonnement de l'autre qui inverse les rôles, on arrive à une relation dans les deux sens, c'est à dire à une interaction.

Pour vérifier la mise en place du modèle, pour les plus rapides, et contribuer à sa construction pour les autres, on peut imaginer, (en précisant bien le contrat didactique, sinon l'exercice est très mal vécu et sans effet), de proposer une demande de prévisions sur des circuits partiellement cachés, tels ceux présentés par S.Fauconnet (1981). Avant enseignement l'élève n'est nullement gêné pour prévoir le fonctionnement de la partie visible, maintenant éprouve-t-il le besoin de connaître l'ensemble du circuit ?

D – Champ de contraintes

Un enseignement se déroule à une époque qui correspond à un stade de l'évolution scientifique (de la connaissance scientifique et de la représentation de la nature de cette connaissance), a pour objectif l'acquisition d'un savoir par un certain public, en un lieu donné, par des enseignants. Cette affirmation révèle toutes les interactions participant à la conception et à l'expérimentation de la séquence et évoque, par là même, l'origine des contraintes qui ont pesé sur son élaboration.

I / Contraintes épistémologiques

Ce sont des contraintes en lien avec la nature du savoir qui fait l'objet de l'enseignement, sa légitimation par rapport au savoir savant, et donc ce sont en partie des contraintes que l'on pourrait qualifier de « sociales ».

La connaissance actuelle de la nature du savoir scientifique impose une nouvelle approche de son enseignement : « *Les caractéristiques des concepts et des modèles imposent des contraintes quant à leur mode de construction. Un mode inductif qui fonctionne assez bien au plan cognitif, n'est pas toujours possible...* » même si « *Les difficultés liées aux démarches hypothétiques...* » justifient parfois son emploi (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993 ; p.185). Aujourd'hui nous ne pouvons plus concevoir un enseignement qui transmette la connaissance scientifique telle un **dogme**, qui délivre une vérité universelle. Au niveau d'apprentissage auquel se situe la séquence, il convient de familiariser l'élève avec une démarche hypothético-déductive : lorsqu'une question est soulevée, le conduire à ne plus fournir la **réponse** évidente et irréfutable, mais le mettre en recherche, par tests d'hypothèses, d'une **réponse** satisfaisante à son niveau de connaissance, réponse susceptible d'évoluer avec celui-ci. Peut-être aura-t-on l'occasion de l'amener à découvrir qu'il existe **plusieurs théories**, chacune ayant un domaine de validité restreint, coexistant avec d'autres, ayant d'autres domaines de validité.

En référence au savoir savant, l'élève doit apprendre le rôle du **modèle**, invention des scientifiques, sa distance et sa fonction par rapport au réel. Mais l'élève ne peut le construire entièrement seul : ce sera à partir d'éléments fournis, qu'il devra s'approprier et enrichir de propriétés, de relations, qu'il bâtera peu à peu un modèle représentant, pour lui, un fonctionnement du circuit électrique qui soit explicatif et prédictif.

Ainsi, l'analyse épistémologique des contenus à enseigner, en éclairant la nature inventée, construite, hypothétique et révisable de la connaissance scientifique conduit à émettre l'hypothèse que l'enseignement ne peut plus se limiter à un cours magistral purement **transmissif**. Toutefois l'élève ne peut pas tout réinventer et reconstruire seul : le transmissif apparaît nécessaire à condition de correspondre à un besoin, venir en réponse à une question de l'élève, ce qui situe son niveau d'apprentissage « *l'apprentissage se situe au sein d'une démarche active de résolution de problème ayant du sens pour l'élève.* » (J.L.Closset, 2000)

La connaissance scientifique progresse tous les jours : nous pensons que la **connaissance** de l'élève doit aussi être pensée comme **évolutive**, partir du niveau actuel de l'élève, ce qui nécessite une transposition à un niveau élémentaire, (étant donné ce que l'on attend de l'élève qui entre en seconde à partir de nos analyses préliminaires), puis, par petits pas (L.S.Vygotsky, 1978), atteindre une connaissance ayant un pouvoir explicatif et prévisionnel plus grand. Cette connaissance doit satisfaire la curiosité de l'élève, lui permettre une meilleure compréhension des phénomènes donnés à observer, mais aussi du monde matériel qui l'entoure et l'inviter à poursuivre sa quête d'explications.

Dans ce but, elle ne peut être ni entièrement **qualitative**, ni uniquement **formelle**. De même que le physicien commence toute étude par une analyse qualitative, et s'en sert aussi pour vérifier ses résultats, nous pensons que l'élève devrait avoir été habitué à se former une représentation qualitative de la situation proposée, avant de la traduire par des grandeurs physiques, passer au symbolisme et enfin les relier par des équations mathématiques. A ce stade seulement un travail sur les expressions symboliques peut devenir producteur de significations : l'élève pourra leur donner un contenu, du sens.

II / Contraintes cognitives et affectives

Cet enseignement est destiné à des élèves de 14-16 ans, qui ont déjà reçu un enseignement en physique, et plus particulièrement en électricité. Nous avons à tenir compte de ce public, de ses caractéristiques et de ses ressources cognitives, ainsi que de son expérience de la discipline :

1 – Caractéristiques cognitives

Dans le cadre de l'hypothèse constructiviste, l'élève apprenant à partir de ce qu'il sait déjà, le plus souvent par un processus d'assimilation et d'accommodation, nous devons tenir compte de ses connaissances avant enseignement et des structures cognitives habituellement mises en oeuvre.

Une étude transversale aux représentations en électricité, mais aussi dans les autres domaines de la physique, fait ressortir leur tendance :

- à attribuer des **propriétés intrinsèques** aux objets (A.Benséghir & J.L.Closset, 1993), par exemple le débit constant du générateur ;
- au **substantialisme** qui consiste à matérialiser les concepts, tel le courant, fluide matériel dont il est possible d'obstruer le cours par un barrage (interrupteur ouvert ou résistance) ;
- à **réduire le nouveau au familier**, réinvestir l'acquis : les phénomènes en jeu sont appréhendés au travers de conceptions relatives à des phénomènes usuels, modifiés de façon minimale pour intégrer les traits phénoménologiques nouveaux. Il s'agit là d'un fait épistémologique assez général (T.S.Kuhn, 1983) observable en cours d'enseignement (S.Johsua, 1988) ;
- à **réduire un raisonnement à plusieurs variables simultanées à une seule** : là où la physique introduit plusieurs grandeurs, l'élève utilise une notion unique, telle la notion de courant qui joue à la fois le rôle des concepts d'intensité et d'énergie. Ce fluide énergétique permet à l'élève de se dispenser également du concept de d.d.p. ;
- à penser les **variables physiques positives** et non algébriques en lien avec le langage courant dont les mots sont tous associés à des grandeurs positives : les mots altitude et profondeur, par exemple, permettent de répondre à ce besoin. En électricité, ceci conduit à privilégier une expression non algébrique de la loi des nœuds et à envisager la difficulté de l'introduction d'une grandeur algébrique comme la d.d.p. ;
- à emprunter un **raisonnement causal linéaire**, comme par exemple le raisonnement séquentiel, ou envisager des relations « agent – médiateur – patient » dans le fonctionnement du circuit électrique : la représentation la plus fréquente est celle d'un générateur qui agit sur le circuit, celui-ci ne subissant aucun effet en retour d'éventuelles modifications du circuit ;
- à son **besoin de concret** qui nécessite le support d'images, ou mieux d'analogies, qui devront être souvent mises à contribution pour illustrer les explications, ou pour prévoir à propos une situation nouvelle.

2 – Ressources cognitives

Elles sont définies par G.Lemeignan et A.Weil-Barais (1992, p.186) : « *Les ressources cognitives des élèves auxquelles il est possible de faire appel pour construire des concepts nouveaux sont multiples. Elles appartiennent à différents registres* », par exemple :

2 - a – Le registre « des représentations symboliques »

- « **le langage naturel** » : en fait nous aurons à nous méfier du langage quotidien souvent éloigné du langage scientifique. Ne pas commencer par nommer le concept, évite de se donner l'illusion que si l'élève possède le vocabulaire, il a aussi la connaissance.

- « **les mathématiques** » ont développé un système de **représentations symboliques**, que l'élève a l'habitude de manipuler pour lui-même, vides de toute signification autre que mathématique...

- « **les représentations graphiques** », se présenteront surtout sous la forme du schéma électrique : l'élève qui entre en seconde connaît le symbolisme des éléments du circuit ; il lui reste à en maîtriser les conventions pour qu'il puisse établir le lien entre le symbolisme graphique et le circuit réel. Ainsi le schéma pourra jouer son rôle d'intermédiaire entre les concepts et le circuit réel.

2 - b – Le registre « des expériences pratiques »

L'élève arrive avec des aptitudes manipulatoires, il lui reste à découvrir comment l'expérience peut devenir un outil d'acquisition de connaissances théoriques : il devra apprendre à traduire ses observations (appartenant au monde réel, par exemple la lampe éclairée) en termes de concepts (constructions de l'esprit scientifique : le courant passe) ou au contraire, à partir des propriétés des concepts, prévoir le comportement d'un circuit électrique réel et à le vérifier par l'expérience.

3 – Le vécu de l'élève en classe de physique

Nous avons à tenir compte du passé de l'élève en classe de physique : des collègues de collège témoignent que les élèves plus jeunes ont moins de réticence à entrer dans le jeu de l'apprentissage de la physique : en 5^e ils sont actifs et intéressés, moins en 4^e et surtout en 3^e. Ce comportement limite la portée de ce qu'on pourrait attendre de l'enseignement en collège, mais surtout explique que l'élève qui entre en seconde a souvent mal vécu cette discipline en collège et arrive résigné : « je suis nul en physique »... « je n'y comprends rien.. »

L'enseignant, à l'entrée en seconde doit déployer des trésors d'imagination et d'énergie pour motiver l'élève en situation d'échec en physique et l'enrôler pour un nouvel apprentissage dans cette discipline. Il doit surtout l'encourager à s'exprimer, à expérimenter et lui faire découvrir qu'il est normal de faire des erreurs, qu'il va pouvoir apprendre et progresser à partir de ses erreurs. Considérer sa connaissance actuelle comme une hypothèse soumise au débat scientifique ou au test expérimental peut constituer un élément d'appropriation de la question par l'élève, d'où naît le besoin de comprendre, le désir de savoir.

Il y aura donc à faire accepter un autre contrat didactique, une autre gestion de l'apprentissage par l'élève.

III / Contraintes didactiques

La séquence sera expérimentée en situation de classe, avec pour enseignant dans un premier temps le chercheur, puis des enseignants choisis sur le seul critère du volontariat. Cette expérimentation a rencontré différentes contraintes didactiques ayant pour origines :

1 – Le programme et les directives officielles : les contraintes respectées et celles aménagées

1 - a - Les objectifs du programme

Si la séquence se déroule avec les élèves d'une classe, à la place de l'horaire réservé à l'enseignement du programme de physique, ceci impose que les élèves, en fin d'année aient travaillé l'ensemble du programme de seconde. Ceci impose qu'ils aient au moins les mêmes aptitudes que les autres en électricité, et les mêmes connaissances au niveau du reste du programme.

Les objectifs d'apprentissage de la séquence, à savoir les concepts à la base de l'électrocinétique reliés par la loi d'Ohm recouvre une partie de l'enseignement de l'électricité de la classe de seconde. C'est à dire que **nos objectifs d'apprentissage cadraient avec le programme**, mais pas du tout avec l'horaire global que nous devons consacrer à ce qu'ils considéraient comme des révisions ou, au mieux, des approfondissements. Il a fallu prévoir des aménagements avec certaines habitudes d'enseignement de ce programme de physique en seconde : la planification des séances de T.P. au sein de l'établissement et l'horaire global consacré à cette partie du programme. Par contre d'autres contraintes ont été respectées, comme l'horaire hebdomadaire ou les effectifs.

1 - b – La planification des séances de travaux pratiques

L'organisation interne à la plupart des établissements fonctionne sur un roulement entre collègues et entre salles de travaux pratiques de physique ou de chimie. Habituellement cette planification impose pour une classe donnée l'alternance régulière hebdomadaire : une semaine T.P. de physique, une semaine T.P. de chimie. La progression de la séquence nécessitait des travaux pratiques de physique beaucoup plus fréquents, pratiquement toutes les semaines... Le matériel nécessaire étant essentiellement constitué de piles, d'ampoules et de fils pendant très longtemps, les séances de T.P. ont pu se dérouler dans n'importe quelle salle et donc toutes

les semaines. Pendant cette période, en chimie l'enseignement portait sur le modèle microscopique de la matière : atome, molécule, ions, schéma de Lewis, élément chimique... les élèves ne se trouvaient pas pénalisés par une absence de travaux pratiques en chimie.

1 - c - L'horaire global consacré à l'électrocinétique

Cette partie du programme comporte « l'utilisation de l'oscilloscope pour visualiser une tension et mesurer ses caractéristiques » et « l'amplificateur opérationnel » que nous traiterons en plus de la séquence (ce qui doit occuper 2 séances de T.P. sur les 4 prévues). L'horaire officiel que l'enseignant doit consacrer à la partie électricité serait de :

- 10 heures de cours magistral, classe entière et
- 4 séances de travaux pratiques (T.P.) en demi groupe, de une heure et demi chacune.

Nous avons du amplifier l'horaire global consacré à l'électricité : la séquence a occupé 12 heures de cours et 8 séances de T.P., soit un total de 24 heures, c'est à dire une durée au moins double de celle normalement prévue, mais avec une bien plus large place au travail expérimental dont la durée se trouve, elle, multipliée par quatre.

Ce choix impose de consacrer moins de temps au son et à la lumière, ce qui est devenu réalisable par le réinvestissement de connaissances acquises en électricité, comme par exemple :

- la chaîne énergétique : en électricité comme avec le son ou la lumière il se produit un transfert d'énergie entre deux transformateurs : l'émetteur ou le générateur d'une part et le récepteur d'autre part ;
- la notion de modèle qu'ils retrouvent avec le rayon lumineux pour se représenter la propagation rectiligne de la lumière, ou avec les modèles moléculaires en chimie.

1 - d - L'horaire hebdomadaire

Il est officiellement de une heure de cours de physique, une heure de cours de chimie et une séance de T.P. d'une heure et demi. C'est **une contrainte que nous avons respectée**, en conservant l'heure de cours de chimie, mais en privilégiant en début d'année des T.P. en physique, comme expliqué ci-dessus ce qui nous a imposé de commencer la chimie par une partie peu expérimentale.

1 - e - Les élèves : effectifs et hétérogénéité

Dans un cadre scolaire, les effectifs sont une **contrainte incontournable** : toutes les classes de seconde comptent environ 34 élèves. Selon les établissements, les classes sont réellement indifférenciées c'est à dire composées d'élèves aux centres d'intérêts variés, ou différenciées, par exemple à partir du projet personnel de l'élève comme à Brive, dont voici un extrait du projet d'établissement : « *Constituer des divisions de seconde en prenant en compte le projet de l'élève quant au baccalauréat envisagé, si ce projet existe.* » Ainsi les élèves de seconde de notre Lycée appartiennent soit à des classes dites :

- « scientifiques » : elles étaient composées d'élèves dont le projet professionnel, (ou les goûts de l'enfant) exigeaient un baccalauréat série S ;
- « littéraires » : ces élèves avaient plus de goût pour les lettres que pour les sciences, ou un projet passant par un baccalauréat série L ;
- « indifférenciées » regroupant à la fois des élèves au projet professionnel passant par un baccalauréat série ES, et ceux dépourvus de projet en fin de classe de 3^e.

Dans un premier temps, notre séquence s'est trouvée enseignée dans l'établissement du chercheur, à des élèves de classes « scientifiques » ainsi qu'à des élèves de classes « indifférenciées ». Par la suite elle a été expérimentée dans d'autres académies avec des élèves de classes réellement indifférenciées. Ce terme se trouve recouvrir des réalités différentes. Nous distinguerons alors les élèves « non scientifiques » de Brive des élèves indifférenciés des autres académies.

Ainsi il arrive qu'à l'hétérogénéité des représentations à l'entrée en seconde vienne s'ajouter celle de la motivation de l'élève pour les matières scientifiques.

2 – Le contrat didactique

Nous avons profité de l'ambiguïté qui naît des implicites à son sujet, des habitudes qui font que les pratiques ne sont peut être pas en accord avec l'esprit des programmes, pour préciser un contrat plus en accord

avec les résultats des recherches actuelles en didactique. Les enseignants ont eu à gérer un nouveau contrat didactique, que le chercheur a pu progressivement affiner et qui se trouve en rupture avec la démarche habituelle d'enseignement des sciences physiques. Hélas, il a été impossible d'envisager une quelconque formation des autres enseignants de la séquence, si ce n'est par une note introductive à la séquence (annexe IV). On peut imaginer :

- que le stagiaire, travaillant sous la tutelle directe du chercheur, soit resté proche du contrat souhaité ;
- peut-être en a-t-il été de même à Nantes où les expérimentateurs étaient aussi des stagiaires en lien avec un chercheur en didactique ;
- mais les autres expérimentateurs, enseignants expérimentés ouverts à d'autres approches pédagogiques, ont mis en oeuvre le déroulement de la séquence sans peut-être bien mesurer la « révolution » dans les rôles et places des acteurs et des activités.

3 – Contraintes liées à l'expérimentation de la séquence

Chaque enseignant chargé d'expérimenter était aussi en charge du recueil de données : dans ces conditions, comment rassembler un maximum de données ?

Nous avons essayé de relever le plus de traces écrites possibles : les questionnaires et les évaluations qui ont permis un suivi par élève et de répondre à la question : par quelles étapes d'apprentissage passe chacun ?

Chaque fois que cela a été jugé nécessaire pour préciser une réponse, et que c'était réalisable pour l'enseignant - chercheur et pour l'élève, nous avons réalisé des entretiens. Ce fut en particulier le cas pour donner un sens aux absences de réponse.

Nous sommes conscients que la contrainte de recueillir des données, liée à celle des effectifs d'une classe, ou même d'une demi classe en T.P., a limité nos possibilités d'observations. Elles ne nous permettent pas, par exemple, de nous intéresser aux interactions sociales. Ce n'est pas que nous sous estimions leur rôle, c'est un aspect intéressant auquel nous ne nous sommes pas consacrés, qui pourrait faire l'objet d'une autre recherche.

Conclusion

La conception de la séquence a exploité les degrés de liberté existant au niveau de l'enseignement tout en respectant l'horaire hebdomadaire (même si nous avons utilisé un horaire année globalement double), les effectifs normaux d'une classe et les objectifs du programme. Ceci nous a permis d'imaginer et d'expérimenter une séquence d'électricité en classe de seconde basée sur un contrat didactique attribuant un rôle différent tant aux acteurs (professeur – élèves), qu'aux activités (T.P., exercices, évaluations...) participant à l'apprentissage et de recueillir des observations concernant les effets de nos hypothèses ainsi que les étapes d'apprentissage qu'empruntent les élèves.

Chapitre II

ANALYSE A PRIORI

A – Connaissances sur les processus d'apprentissage

L'analyse des objectifs généraux de la chimie constitue une aide pour formuler les réserves qui sont les nôtres vis à vis des objectifs de l'enseignement de la physique reposant sur une hypothèse inductiviste de l'apprentissage. Les outils proposés pour la conceptualisation ou l'élaboration d'un modèle en physique sont la mesure, déjà commentée, ou l'observation. Or, l'histoire des sciences, comme par exemple la recherche de F. Chauvet (1994) sur la vision des couleurs, montrent qu'il existe des corrélations entre ce que l'élève s'attend à voir avant l'expérience et ce qu'il déclare voir pendant : on ne voit pas ce qui est inconcevable, il ne suffirait donc pas d'observer pour voir.

Nous voici à la recherche d'autres hypothèses sur l'apprentissage en sciences. Il apparaît aujourd'hui que dans tout apprentissage, l'activité intellectuelle de l'élève est centrale, thèse principale du constructivisme :

I – Le constructivisme

1 – L'hypothèse constructiviste

G.Lemeignant & A.Weil-Barais (1993, p.20) affirment : « Depuis deux décennies, il est admis que tout individu qui apprend, le fait avec ses propres structures cognitives ».

S.Johsua & J.J.Dupin (1993, p.92) décrivent l'hypothèse d'apprentissage qui « recueille le plus large consensus » en ces termes : « On suppose actuellement que l'apprentissage résulte de constructions mentales que l'élève construit en réponse à des informations ou stimuli de son environnement. »

Auparavant, J.L.Closset (1989) parlant d'une « vérité largement admise » écrivait : « Lorsqu'on enseigne, particulièrement les sciences, et plus particulièrement encore la physique, à des élèves de l'enseignement secondaire, on n'écrit pas sur une page blanche.

D'abord parce que l'enseignant n'écrit pas, mais que seul l'élève peut écrire ou si l'on préfère peut apprendre et ensuite et surtout parce que la page n'est pas blanche. C'est précisément avec et en fonction de ce qui s'y trouve déjà que l'élève pourra construire, en interaction avec l'enseignement, de nouvelles connaissances. »

Ainsi, comme l'exprimait déjà J.Piaget (1976) « L'enfant contribue activement à la construction de sa personne et de son univers » : à partir de ses structures cognitives et de ses représentations avant enseignement il construit des connaissances par une interaction active avec son environnement physique et social.

2 – Conséquences

Un apprentissage serait une construction à partir des représentations et des structures cognitives. Cela signifie par exemple que les connaissances ne s'empilent pas les unes sur les autres puisqu'elles sont structurées, et qu'elles ne sont pas un simple reflet de la structure objective des objets extérieurs.

Or nos analyses ont confirmé que l'enseignement de la physique privilégie encore la démarche inductiviste, connue de G.Bachelard. Ses recherches à propos d'un enseignement qui considère l'enfant comme une « cruche vide » qu'il suffirait de remplir, ou d'« une cire molle » qu'il suffirait d'imprimer (E.Bonnot de Condillac, 1754) l'ont conduit à être parmi les premiers à remettre en cause l'idée d'un élève « vierge de toute connaissance » et à susciter une réflexion à ce sujet : « J'ai souvent été frappé du fait que les professeurs de science, plus encore que les autres si c'est possible, ne comprennent pas qu'on ne comprenne pas. Peu nombreux sont ceux qui ont creusé la psychologie de l'erreur, de l'ignorance et de l'irréflexion ... Ils n'ont pas réfléchi au fait que l'adolescent arrive dans la classe de physique avec des connaissances empiriques déjà constituées. » (G.Bachelard, 1938)

Tous les travaux de didactique sont venus confirmer que l'élève arrive en classe avec, dans la tête, des idées sur les phénomènes auxquels quotidiennement la vie le confronte. Ces connaissances résultent d'un processus de construction personnelle : chaque apprenant construit ses propres connaissances à partir des situations qu'il expérimente (J. Piaget, 1967). Les structures de l'intelligence ne sont pas données une fois pour toutes à la naissance, mais font l'objet d'une construction progressive par interaction du sujet avec son environnement. Ainsi, avant toute activité scolaire, les enfants disposent de certaines représentations à propos du monde matériel dans lequel ils vivent : *« l'élève n'est pas un simple réceptacle dans lequel on déverse des connaissances (qu'il suffirait dès lors de bien organiser), on n'apprend pas seulement en s'imprégnant par l'ouïe, par la vue et grâce à une disposition psychologique favorable de ce que le maître aura répété un nombre raisonnable de fois. Dans cette perspective, généralement qualifiée de « constructiviste », l'élève construit activement ses connaissances à partir de celles dont il dispose et des apports extérieurs. »* L. Viennot (1989)

Ce point de vue constructiviste s'oppose au point de vue transmissif en plaçant l'élève au centre des situations d'apprentissage où le rôle des connaissances qu'il possède déjà est décisif. Le professeur ne doit pas manquer de les prendre en compte : pour définir un enseignement il convient de connaître les idées et les modes de pensée de ceux à qui on le destine. Il sera important de préciser les modalités de cette construction afin de mieux maîtriser la manière dont l'enseignement peut y participer, d'envisager des démarches qui puissent introduire et stabiliser chez les élèves des modes de pensée différents qui seraient plus proches des modèles et des démarches scientifiques.

3 – L'activité intellectuelle de l'apprenant

Avant enseignement, l'esprit de l'élève n'est pas vierge de toute connaissance. *« Avant sa première rencontre avec un cours de physique, un enfant a déjà vécu de nombreuses années ... dans un environnement où l'électricité est très présente ... Il a des expériences vécues et donc des modèles explicatifs ... dans bien des cas différents des modèles construits par les physiciens »* (A. Dumas-Carré & M. Goffard, 1997).

Ces connaissances empiriques, sont suffisantes au quotidien pour guider leurs actions et rendre compte de leurs observations. Elles ont un certain nombre de caractéristiques :

- leur apparition présente un caractère récurrent : pour un même phénomène, les mêmes conceptions se manifestent ;
- elles résistent au changement, car elles ont un domaine de validité suffisant pour la vie quotidienne. Elles se manifestent encore après enseignement, ce qui veut dire que celui-ci ne pourra les ignorer sous peine de les voir perdurer.

C'est à travers ses représentations que l'élève essaie de comprendre les propos de l'enseignant ou qu'il interprète les situations proposées ou les documents fournis : le contenu et le mode d'organisation de la base de connaissances de l'élève lui sert à la fois de grille de lecture, d'interprétation et de prévision de la réalité, ce que A. Giordan appelle « sa prison intellectuelle ».

3 - a – La sélection de l'information

« Tout système cognitif est obligé de filtrer et de sélectionner l'information. Il retient généralement celle qui renforce sa stabilité et celles dont il perçoit la valeur d'usage. » (G. Lemeignan & A. Weil-Barais, 1993 ; p.20)

Les représentations participent à ce rôle de grille de lecture, font le tri entre ce qui paraît pertinent ou non :

- on ne voit pas ce qui est inconcevable, même si le fait existe réellement ;
- on voit ce qu'on s'attend à voir indépendamment de l'existence réelle du fait.

Pour acquérir des connaissances nouvelles l'élève devra prendre en compte un minimum d'informations nouvelles sur des situations problématiques :

- Les travaux ont montré qu'en ne tenant pas compte des conceptions, elles se maintiennent et le savoir proposé glisse généralement à la surface des élèves sans même les imprégner.
- Si l'on veut faciliter l'apprentissage, c'est à dire un processus de transformation des façons habituelles de raisonner des élèves, il faut que les élèves aient l'occasion d'exprimer leurs conceptions lors des séquences d'enseignement :

« Toute appropriation procédant d'une activité d'élaboration d'un apprenant confrontant (conflit cognitif) les informations nouvelles et ses connaissances mobilisées, et produisant de nouvelles significations plus aptes à répondre aux interrogations qu'il se pose » (A. Giordan, 1996).

De ce point de vue, enseigner serait aider à la mutation des systèmes de représentations des apprenants, utiliser ces représentations comme tremplin pour l'apprentissage, faire avec pour aller contre (A.Giordan, 1996), oui mais comment ? Nous allons voir que tout dépend, entre autre, de la distance qui sépare les représentations de l'élève de la connaissance nouvelle :

- soit elle est transformée pour pouvoir être intégrée aux structures existantes : il y a assimilation ;
- soit, si elle ne peut être assimilée telle quelle, il peut arriver que les structures cognitives changent : il y a accommodation pour permettre l'assimilation.

3 - b – L'assimilation des informations

G.Lemeignan & A.Weil-Barais (1993, p.22) fournissent une définition : « *L'assimilation est un mécanisme psychologique qui modifie les données extérieures par un ensemble d'opérations mentales* » et (p.23) précisent qu'en physique « *l'assimilation, comme processus de construction de connaissances, est rarement efficace* » puisque les modes d'interprétation du monde qui y sont proposés sont en rupture avec la pensée commune :

« les modes d'interprétation acquis dans la vie quotidienne font généralement appel aux propriétés des objets, à leur fonctionnement et aux caractéristiques des actions menées sur eux... L'interprétation par un physicien : il examinera quels sont les systèmes en interaction et cherchera les grandeurs physiques nécessaires et suffisantes pour décrire l'état des systèmes, les variations d'état, et les transferts entre systèmes pour répondre aux questions qu'il se pose. »

Le fait que les élèves utilisent leur mode habituel d'interprétation pour donner sens aux informations qui leur sont données, constitue une sorte de traduction du message émis par l'enseignant : le message perçu par l'élève est différent de celui émis. Dans un enseignement essentiellement transmissif, qui ignore ce mécanisme d'assimilation des informations, les partenaires s'engagent dans un dialogue de sourds dont on ne peut guère attendre de progrès cognitifs.

Connaissant les représentations, leur validité dans la vie courante, ce qui les rend stables et résistantes à l'enseignement il est important de repérer :

- si la pensée peut valablement procéder par assimilation et dans ce cas mobiliser les ressources cognitives ;
- ou, au contraire, si l'élève doit procéder à des changements cognitifs importants : dans ce cas nous verrons que l'élève doit prendre conscience de ses modes de pensée, de leur fonctionnalité et de leurs limites si nous voulons pouvoir l'inviter à risquer l'aventure consistant à emprunter d'autres fonctionnements et / ou d'autres modes d'interprétations.

3 - c – L'accommodation des structures cognitives

L'accommodation peut intervenir lorsque les structures cognitives actuelles ne sont pas capables d'assimiler les informations reçues par le système cognitif :

« en vitesse de croisière, la pensée sélectionne et assimile, en cas de difficulté majeure, ou repérée comme telle, la pensée va entreprendre un processus de transformation sur elle-même. »

L'accommodation ne peut être qu'exceptionnelle, car le changement entraîne une déstabilisation dont l'issue est incertaine et qui mobilise des efforts intellectuels plus importants que l'assimilation.

Pour que ce processus d'accommodation se mette en oeuvre il faut (conditions nécessaires, mais non suffisantes) qu'il y ait :

- réception des informations de la part de l'élève,
- qu'il accepte ce qui dérange,
- qu'il ait confiance dans ses capacités intellectuelles pour s'engager dans l'inconnu et
- qu'il fasse assez confiance au professeur pour accepter de faire le chemin avec lui. (G.Lemeignan & A.Weil-Barais, 1993 ; p.24)

L.Gomatos (1996, p. 9) décrit une théorie explicitant sous quelles conditions un concept finit par être remplacé par un autre, à partir d'un parallélisme entre activité de recherche et processus d'apprentissage :

« Les conditions d'une accommodation sont les suivantes :

- *une non-satisfaction doit exister envers les conceptions déjà existantes ;*
- *une nouvelle conception doit être intelligible ;*
- *une nouvelle conception doit être plausible ;*
- *un nouveau concept doit ouvrir le chemin vers des programmes de recherches. »*

L'abandon d'un mode interprétatif familial impose de changer de registre de fonctionnement : d'automatique, la pensée doit fonctionner de manière contrôlée. Les changements cognitifs ne sont pas aisés, aussi sont-ils progressifs, nécessitent d'aménager des transitions (L.S.Vygotski, 1978), et s'effectuent sur une très longue durée.

Conclusion :

Dans un cadre constructiviste, l'apprentissage serait basé sur l'interaction sujet-environnement, sachant que dans cet environnement se trouvent les pairs et l'enseignant dont les interventions sont importantes (Bruner et L.S.Vygotsky, 1978). Le savoir est conçu comme un processus dynamique, résultat de l'activité d'apprentissage.

Pour qu'un élève puisse apprendre, il ne suffit donc pas de lui exposer les connaissances de la physique tout élaborées, ce qui était le point de vue transmissif des cours magistraux. Le point de vue constructiviste place l'élève au centre des situations d'apprentissage : l'activité intellectuelle de l'élève est centrale, chaque apprenant pilote son apprentissage d'une manière personnelle. Apprendre ne consiste pas à empiler des informations mais à **transformer des structures cognitives** pour passer d'une cohérence à une autre :

« Il faut mettre l'élève en situation de construire et structurer des connaissances au travers d'activités spécifiques choisies, organisées et gérées par le professeur. L'élève apprend avec les connaissances qu'il possède déjà et en étant actif » (A.Dumas-Carré & M.Goffard, 1997) : il doit agir pour apprendre.

Cette dynamique peut naître de la résolution d'un problème : chaque élève interprète la situation qu'on lui présente, les questions qu'on lui pose à partir des représentations dont il dispose et qui lui permettent une lecture de cette situation ou question. L'évocation de ses connaissances antérieures, mise en présence de celles d'autres élèves, qui se révéleraient incompatibles avec les siennes, peut être à l'origine d'un débat scientifique et d'une remise en question. Leur confrontation à l'expérience crée une situation problème. C'est cette confrontation, les oppositions de points de vue observées en avançant les justifications qui leur paraissent logiques qui donnera sens à l'apprentissage et sera susceptible de faire progresser le savoir de l'élève. Ces représentations prennent alors le statut de véritables hypothèses à discuter, ce qui peut donner envie de comprendre :

« L'apprentissage consiste en un processus d'intégration complexe d'informations nouvelles par rapport à des informations anciennes. Les opérations intellectuelles essentielles seraient des opérations de comparaison. Autrement dit les élèves apprendraient, inventeraient à partir de ce qu'ils savent déjà » (A.Weil-Barais, 1984), ce qui n'est pas sans conséquences pédagogiques au niveau des rôles des acteurs et des activités participant à l'apprentissage.

II – La dévolution

Le but de l'apprentissage est d'amener l'élève à une connaissance nouvelle par construction de modèles dont L.Gomatos (1996) écrit que ce sont des

« outils cognitifs de l'homme dans son effort pour se rendre le monde intelligible »

Nous cherchons à utiliser la recherche de sens comme moteur d'apprentissage puisque *« tout savoir se construit et évolue par résolution de problèmes »* (J.L.Closset, 1983), c'est à dire en réponse à une question, lors d'une recherche d'explications. Aussi de nombreux chercheurs proposent d'engager les élèves dans la résolution de situations-problèmes qui aient du sens pour l'élève. Dans ce contexte la question qui se pose tout naturellement est : comment faire en sorte que la question de l'enseignant devienne une question pour l'élève, qu'elle ait un sens pour l'élève ?

Il y a à imaginer une situation faite pour la construction de connaissances qui puisse permettre à l'élève de s'emparer d'un problème, lui-même calibré en vue de provoquer la construction par l'élève d'un savoir nouveau. Ces « situations d'apprentissage » étudiées par G.Brousseau (1986) seront l'occasion pour le maître, non de la transmission d'une connaissance, mais de la dévolution du bon problème :

« La dévolution est l'acte par lequel l'enseignant fait accepter à l'élève la responsabilité d'une situation d'apprentissage ou d'un problème et accepte lui-même les conséquences de ce transfert. »

« Cet enseignement a pour ambition de faire passer les questions du domaine de l'enseignant à celui de l'élève, d'enseigner les questions autant que les réponses, et autant que possible d'enseigner les connaissances avec leur sens » le savoir étant « une association entre de bonnes questions et les bonnes réponses. »

L'élève ne peut apprendre qu'en produisant, en faisant fonctionner et en faisant évoluer ses connaissances, le maître aura la responsabilité du choix judicieux d'une « situation-problème » à laquelle tout

élève peut fournir une réponse, reflet d'une certaine connaissance dans ce domaine. Ces situations possèdent un éventail de solutions plus ou moins contradictoires qui peuvent être à l'origine d'un débat dans la classe, et du besoin d'un enseignement adapté, qui fera appel à une nécessaire transposition didactique (Y. Chevallard, 1985).

Cette « théorie des situations » conduit à repenser l'apprentissage, une stratégie d'enseignement, la place des éléments en interaction au cours de l'apprentissage, à savoir le rôle :

- du maître en lien avec : le savoir savant et le savoir de l'élève d'une part, mais aussi l'élève et la classe ;
- de l'élève en lien avec : ses représentations, ses pairs et le maître.

III - La pédagogie de la maîtrise

Les travaux de B.S. Bloom (1979) postule qu'avant tout apprentissage il convient de s'assurer de la maîtrise des prérequis, ainsi qu'à chaque étape significative d'un apprentissage. Il montre que si on s'assure d'homogénéiser l'état initial avant un enseignement, de vérifier la présence des connaissances utiles au départ pour l'apprentissage visé, on réduit de moitié la dispersion des résultats à l'arrivée. Pour les élèves ne possédant pas les prérequis jugés nécessaires au nouvel apprentissage, cela impose un enseignement supplémentaire, en situation de classe ou non, et donc de différencier le temps et les moyens selon les besoins de chacun pour permettre une maîtrise par tous des objectifs de base.

Au contraire il pense impossible de faire progresser des élèves différents à partir d'un enseignement identique : si les différences sont trop grandes, l'enseignement passe à côté des structures cognitives qui ne permettent pas d'appréhender l'enseignement reçu. Ce serait par exemple le cas de certains élèves suivant l'enseignement habituel, ce qui fournirait une explication à certaines absences de réponse à nos questionnaires : ces élèves n'ont pas de représentation du circuit électrique : on a brûlé les étapes avec eux. Ils ne progressent plus du tout, sont en échec, ne sont plus motivés et souvent régressent.

Pour notre part nous avons mis en évidence des représentations variées du fonctionnement du circuit électrique chez nos élèves à l'entrée en seconde, sans parler des élèves appartenant à des secondes dites « indifférenciées ». Elles constituent des groupes d'élèves encore plus hétérogènes dans les aptitudes comme dans les aspirations, ce qui représente une situation de départ fort éloignée de la situation idéale, dans le cadre de cette hypothèse.

IV – Les interactions participant à l'apprentissage

Les représentations mentales individuelles acquises et efficaces dans la vie courante sont par là même extrêmement résistantes à l'enseignement. Pour les ébranler elles doivent devenir « *des objets publics discutables* » (L. Gornat, 1996 ; p.223)

L'élève qui apprend n'est pas isolé : il s'établit des interactions entre ses structures cognitives et ses représentations d'un côté et le « phénoménal », les autres et le maître de l'autre. Le processus de construction de connaissances passe par l'expérimentation avec les objets et l'environnement et selon L.S. Vygotsky (1978) on aurait tort d'en négliger l'aspect social : « *Chaque fonction apparaît deux fois dans le développement culturel de l'enfant, d'abord entre individus et, ensuite, dans l'enfant... La vraie direction du développement de la pensée ne va pas de l'individuel au social, mais du social à l'individuel.* »

Nous allons préciser la place de chacune de ces interactions dans l'acquisition de savoirs nouveaux :

1 – Interactions avec le phénoménal

Nous avons parlé des situations-problèmes qui appartiennent à la « pédagogie du problème » exposée par S. Johsua & J.J. Dupin (1993, p.328) : la situation d'apprentissage conçue par l'enseignant doit amener l'élève à la formulation du problème si la « dévolution s'opère ». alors il devient son problème, né de l'interaction entre les représentations, les prévisions qui en découlent et le phénomène observé. Pour arriver à mettre en présence ces deux « réalités » il faut pouvoir les faire surgir ensemble et l'expérience est un moyen que nous avons privilégié.

Un questionnaire susceptible de faire exprimer des représentations différentes d'une même situation est passé à la classe. Chacun y répond à l'aide de ses structures cognitives. L'expression orale de sa prévision par

chaque élève (argumentée, défendue, soutenue mais aussi attaquée par les autres) fait passer les représentations du domaine privé au domaine public et fait apparaître leur diversité : elles sont devenues des « *objets publics discutables* ». Si à l'issue de cette discussion, chacun ne souscrit pas à une réponse commune, chaque prévision devient une hypothèse à tester expérimentalement. La réalisation de l'expérience est rapide pour ces élèves, et le phénomène observé sans ambiguïté : la lampe éclaire ou n'éclaire pas, elle éclaire pareil, plus ou moins... Si ce n'est pas ce que l'élève avait prévu, la situation devient énigmatique, condition suivant laquelle le problème prendra sens pour lui. Il s'étonne, s'interroge, prend conscience que son raisonnement naturel, qui a pourtant une validité, ne lui a pas permis de prévoir, ne lui permet pas plus d'expliquer ce qu'il observe. Ces observations sont alors susceptibles de déstabiliser provisoirement les savoirs antérieurs, ce qui crée une situation favorable à l'apport d'informations nouvelles.

2 – Interactions avec le maître

C'est au maître que revient la **gestion du processus d'apprentissage, en interaction avec les stratégies de l'apprenant**, par des choix :

2 - a – Le choix de la situation à l'origine de l'apprentissage

En effet, « *c'est le partenaire social qui organise le monde physique auquel l'élève pourra accéder pour des manipulations, des expériences utiles* » (F. Winnykamen, 1996 ; p. 28-29) c'est à dire mettre en place des situations d'apprentissage qui permettent aux élèves d'exprimer leurs manières de penser (A. Weil-Barais & G. Lemeignan, 1992) :

- il a le choix de la situation de départ qui doit être simple, les élèves ayant théoriquement les outils pour répondre ;
- il devra vérifier que les pré-requis sur lesquels il compte appuyer le nouvel apprentissage sont présents dans la population afin que l'élève puisse les mettre en relation avec la situation proposée ;
- la situation sera construite pour permettre aux élèves de s'emparer d'un problème calibré en vue de provoquer la nécessité de construction, par l'élève, de connaissances nouvelles ;
- c'est l'occasion de prendre conscience des représentations des élèves, quels obstacles elles constituent par rapport au modèle à construire, et donc le choix de démarches :

2 - b – Le choix des étapes par lesquelles passera l'apprentissage

Il est aussi « *le partenaire qui par ses questionnements aide à la déstabilisation qui permet le conflit et la prise de conscience.* » Il aura à :

- concevoir les articulations possibles entre les compétences cognitives actuelles des élèves et les compétences visées et à
- organiser les ruptures qu'ils sont capables d'effectuer avec profit. Le repérage de ces articulations et de ces ruptures conduit à imaginer les moyens à mettre en oeuvre pour aider les élèves à opérer un changement conceptuel dans la « zone proximale de développement » définie par (L.S. Vygotsky, 1978). Cette zone caractérise à la fois
 - o les possibilités d'apprentissage d'un sujet donné à un moment de son développement et
 - o prend en compte les éventualités d'interaction avec un tiers, que ce tiers soit un pair ou un enseignant. Il faut penser l'existence d'un niveau de développement potentiel qui, moyennant diverses formes de médiation, favorise l'accès à un stade supérieur. Cette hypothèse ouvre sur une réflexion qui permettrait une analyse rationnelle des « aides » proposées par le maître à tel ou tel moment. Le rôle de l'enseignant est important puisque « *ce que l'enfant est en mesure de faire aujourd'hui à l'aide des adultes, il pourra l'accomplir seul demain.* » et ce qu'il peut faire avec l'aide d'un adulte constitue la zone proximale de développement, espace dans lequel l'apprentissage doit s'effectuer.

2 - c – Le choix des aides à l'apprentissage

Il revient au maître d'effectuer des choix concernant les formes d'exposition des connaissances, (assurer la médiation entre le savoir scientifique et le savoir construit par l'apprenant), les situations et les questions légitimant les changements conceptuels, les guidages à proposer (reformulations, explications, explicitation...) ainsi que les modes d'évaluation des progrès des élèves.

Cette stratégie du maître est résumée par A.Giordan (A.Giordan, 1996): « *il doit introduire une ou plusieurs dissonances qui perturbent le réseau cognitif que constituent les conceptions mobilisées, puis confronter l'apprenant à un certain nombre d'éléments significatifs pouvant être intégrés à sa démarche.* » A chaque étape, il s'agit de décoder les contraintes, de prévoir les activités ou les interventions favorisant l'apprentissage, de fournir des repères, des aides à la conceptualisation. C'est un régulateur de l'acte d'apprendre résume P.Venturini (1999).

La prise en compte du caractère social et en grande partie conventionnel des connaissances scientifiques le conduit à **valoriser des situations d'échange et de discussion** : d'une manière générale la formation des connaissances s'élaborant au cours des interactions sociales: « *Le professeur favorise et guide les discussions des élèves pour* » ... ébranler leurs représentations, nous disent A.Dumas-Carré et M.Goffard (1997) qui précisent : « *il doit créer un climat de classe favorable à l'expression de tous ; une des manières est de faire comprendre aux élèves que tout ce qu'ils disent a de l'intérêt, peut être écouté par le professeur et les autres élèves, et mérite d'être discuté... Toute situation d'apprentissage nécessite de la part de l'élève une certaine confiance en soi pour remettre en cause ce qu'il pensait jusque là* ».

3 – Interactions entre pairs

« *C'est la prise de conscience par l'enfant de réponses autres que la sienne... Autrui lorsqu'il s'inscrit dans une relation conflictuelle, crée un conflit qui rend explicite la différence... sans ce problème social, l'enfant aurait peu de chance de ressentir un conflit cognitif.* » (W.Doise & G.Mugny, 1981) Le conflit, issu de l'interaction sociale, serait productif de progrès cognitif. Comment ? ... c'est l'opposition de réponses nous dit (W.Doise, 1985 ; p.24) : « *chaque objection suscite une réponse, chaque raisonnement un raisonnement complémentaire, qui entrelace dans un tout inséparable les idées opposées... chaque nouvel effort ajoute un maillon à la chaîne qui entraîne les deux parties dans la spirale de la vérité.* »

Ainsi, l'élément social peut constituer un moteur du développement cognitif de l'élève, à condition (L.Gomatos, 1996 ; p.12) qu'il dispose de certains prérequis (cognitifs : la transmission sociale doit être compatible avec le cadre récepteur) et social (il doit être à même de communiquer et d'interpréter correctement les messages). Le progrès n'a pas toujours lieu : pour que le conflit soit fécond il nécessite la présence explicite de plusieurs points de vue... car

« *C'est en comprenant les idées de son partenaire que l'élève peut prendre du recul par rapport à ses propres actions et tenter d'en vérifier la portée.* » (S.Johsua & J.J.Dupin, 1993 ; p.324) De cette prise de conscience peut naître une déstabilisation d'où peut surgir l'exigence de preuves, la mise en route d'une validation, ce qui exige de l'enseignant une réflexion sur les moyens par lesquels il sortira la classe de cette incertitude.

Amigues (1991) confirme « *l'importance de la déstabilisation des procédures les plus naïves et familières dans le processus de changement conceptuel.* » Nous venons de voir que l'expérience, le maître comme les pairs peuvent y participer.

Au cours de notre séquence les interactions entre pairs se sont vécues, mais nous n'avons pas décidé de les analyser. Elles ont participé à l'apprentissage des élèves. Comment ? Cela restera une inconnue, que d'autres travaux permettraient d'approcher et qu'il serait intéressant de préciser, dans nos conditions d'expérimentation, c'est à dire à l'échelle d'une classe dans les conditions habituelles d'enseignement, à savoir un maître avec 34 élèves en cours et la moitié en T.P..

B – Nos choix, concernant l'apprentissage, sur lesquels se fonde la séquence

Nos choix découlent des objectifs d'apprentissage que nous nous sommes fixés. Nous allons les préciser à partir des principes directeurs de l'enseignement de la physique en classe de 4^e : ils indiquent les buts de cet enseignement qui sont :

« amener progressivement l'élève à l'acquisition des concepts, des lois physiques et de leur utilisation »

Notre objectif est bien d'aider l'élève à se construire une représentation des phénomènes observés en électricité, par accès progressif aux concepts du physicien, concepts introduits et construits par nécessité :

- cette construction s'élabore à partir des connaissances antérieures en interaction avec les observations, les autres élèves et l'enseignant ;
- par nécessité, parce qu'il arrive en réponse à une interrogation. Il permet de comprendre, d'expliquer et de formuler alors des prévisions qui pourront être vérifiées expérimentalement.

C'est une initiation à la démarche scientifique par l'émission d'hypothèses à tester par des expériences qui, soit :

- valident le modèle et même peuvent l'enrichir de propriétés nouvelles,
- infirment le modèle que l'élève s'était construit : alors le professeur propose un modèle à tester, à enrichir sur des situations nouvelles et dont il faut préciser le domaine de validité.

Les principes directeurs de l'enseignement de la physique affichés dans les textes officiels et les objectifs d'apprentissage de la séquence, à ce stade, semblent si voisins que l'on pourrait se poser la question :

« pourquoi cette séquence, en quoi diffère-t-elle de l'enseignement habituel ? »

C'est ce que nous allons préciser :

I - Objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence

1 - Quels sont nos objectifs ?

Ils sont bien (en reprenant l'intitulé de programmes) de **« former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle... de susciter la curiosité... faire ressortir que le monde est intelligible... que les lois physiques constituent une représentation cohérente de l'univers... qui ont un caractère universel dégagé de l'objet... en donnant une place essentielle aux activités expérimentales. »** Mais par une autre démarche se fixant trois objectifs :

1 - a – Partir de l'état réel des connaissances de l'élève arrivant en seconde

Nos objectifs sont nés d'un constat, intuitif pour tout enseignant de seconde, mais que nous avons précisé à l'aide de questionnaires passés à l'entrée en seconde, maintenant sur plusieurs années et plusieurs centaines d'élèves. Ils établissent, nous allons le voir, la diversité de l'état des connaissances en électricité à l'entrée en seconde, diversité expliquée par les origines diverses des élèves qui ont fréquenté des collèges dispersés à travers le département, mais aussi une réalité fort éloignée de ce que pourrait laisser supposer la simple lecture des programmes antérieurs.

L'un de nos objectifs est de laisser à l'élève le temps d'apprendre ... mais les programmes sont vastes, ambitieux et ne peuvent qu'être survolés ... et ce d'autant plus qu'à l'heure actuelle une majorité d'élèves apprend pour réciter et non pour savoir : ils installent des connaissances dans la mémoire à court terme, disquette vite effacée, et non dans la mémoire à long terme, c'est à dire sur le disque dur ...

Dans le cadre constructiviste, nous voulons progresser avec l'élève, à partir de ce qu'il sait déjà, et non à partir de ce qu'il est censé savoir à la simple lecture de textes officiels. Nous pensons aussi que c'est un bon moyen "de ne pas décourager l'élève" : il a le droit d'émettre son hypothèse, de la tester, de réfléchir aux conséquences ... rien n'est à priori ridicule, inacceptable ... cela ne le devient que sous la pression de la communauté scientifique réunie dans la classe et / ou du résultat de l'expérience qui permet de la tester.

1 - b – Initier l'élève à une démarche scientifique

C'est dans ce cadre que toute approche commence par un questionnaire pour tenter d'avoir accès aux représentations de l'élève, qu'il utilise pour prévoir le comportement d'un circuit.... et comme un chercheur, l'élève va confronter ses prévisions à celles des autres chercheurs de sa classe. Les élèves iront vérifier leurs prévisions, utilisées comme hypothèses de recherche, en les confrontant à la réalité du comportement du circuit. Il nous semble qu'ainsi, nous

« formons les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle. »

L'élève doit effectivement : *« rendre compte des observations, réaliser une expérience à partir de ses hypothèses ou de celle du voisin .. , se poser des questions, rechercher une explication, vérifier une hypothèse, exprimer un jugement sur une explication proposée ».*

Ce travail de prévision, d'observation, d'explication est essentiellement qualitatif, pour essayer de se représenter ce qui se passe dans un circuit électrique. Aussi, le circuit ne cessera pas d'évoluer sous la pression des hypothèses à tester : *« et si ... est-ce que ... »* et l'enseignant sera amené à proposer des analogies pour illustrer telle ou telle propriété qui reste mystérieuse. Il s'agit bien d'une

« physique vivante, qui tente de rendre le monde intelligible » ... à l'élève.

1 - c – Rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances

Dans ce but nous chercherons à :

- **éveiller sa curiosité** : à partir de l'expérience initiale qui le conduit à remettre en cause ses prévisions, suscite des questions, le met en recherche, en quête d'explication ...
- **ne pas tout donner d'emblée** comme vérité irréfutable qu'il ne reste plus qu'à vérifier expérimentalement, mais donner seulement l'élément dont le besoin se fait sentir : à l'élève d'en vérifier les conséquences, mais aussi de l'enrichir progressivement de propriétés, limiter son domaine de validité ... d'où une activité expérimentale intense, mais pas spécialement focalisée sur des mesures ..., encore moins sur la vérification de lois, mais sur les hypothèses construites à partir de sa représentation du fonctionnement du circuit, qu'il souhaite tester.

Ce modèle, l'élève est invité à le réinvestir dans des situations nouvelles, à se poser des questions sur l'influence d'une modification du circuit, rechercher une explication ...

On veut à tout prix éviter la recherche de recettes miracles, de circuits types, de relations toutes faites, de formules magiques, utilisables en toutes circonstances, qui évitent de se donner la peine de réfléchir ...

On cherche à s'assurer des représentations de l'élève en lui demandant :

- de les formuler par des phrases
- de les utiliser pour prévoir le fonctionnement d'un nouveau circuit,

le but étant de rendre intelligible un circuit simple et les lois qui l'expliquent, qui devraient devenir inoubliables parce que comprises.

2 - En quoi nos objectifs diffèrent-ils de ceux de l'enseignement usuel ?

2 - a – La prise en compte de l'état initial, tel qu'il est

L'élève est sensé avoir déjà rencontré l'intensité et la tension en classe de 4° et de 3°. Il suffirait donc, si on fait confiance aux programmes, de structurer les lois. Ceci supposerait une classe homogène constituée d'élèves idéaux.

Les élèves ont leur propre représentation de l'électricité, le plus souvent fort éloignée de celle du physicien. Les élèves font appel à une notion vague, unique, d'un fluide matériel aux propriétés énergétiques. C'est avec cette « connaissance » que l'élève aborde le programme de seconde. Nous l'invitons alors à formuler ses hypothèses et à les tester.

2 - b – L'éveil de la curiosité

Nous tenterons de rendre l'élève actif, acteur de son propre apprentissage, de la construction de ses connaissances, par les prévisions qu'il aura bien envie de vérifier, sûr de son coup ... mais des observations surprenantes le conduiront à la recherche d'une explication ... souvent trop vite oubliée au profit de l'idée première ... Aussi des réinvestissements sont proposés d'où de nouvelles prévisions, et l'expérience validera ou réfutera la représentation de l'élève ...

2 - c - L'initiation à l'utilisation d'une démarche scientifique

Initier l'élève à une démarche scientifique requiert non seulement que l'élève soit actif, mais fasse preuve de rigueur lors :

- des tests d'hypothèse ;
- de l'apport progressif d'éléments de concept. Il aura en charge de :
 - o les enrichir de propriétés et de
 - o préciser leur domaine de validité ;
- de la modélisation progressive du fonctionnement du circuit, qui part d'une boucle fermée où circulent des charges, de la cause de cette circulation, en passant par la conservation de la charge, les transferts d'énergie, pour en arriver au système en interaction, équilibre modifié par toute évolution du circuit ...

Il s'agit bien, pour l'élève, d'un « accès progressif aux concepts du physicien » : en partant d'une expérience où il se pose des questions, recherche une explication, il vérifie des hypothèses par la mise à l'épreuve des conséquences, des prévisions qu'elle implique. Il est aussi amené à émettre un jugement sur les prévisions ou les explications proposées par les autres ...

MAIS cela demande du temps, **beaucoup de temps**, comparé à celui officiellement prévu à savoir un T.P. intensité + un sur la tension, à moins qu'il ne soit sur la loi d'Ohm et dans ce cas il faut traiter intensité et tension au cours d'une même séance ... quelques mesures rapides ... pas le temps d'émettre des hypothèses, de s'étonner de voir ses prévisions bafouées même quand on a bien vérifié son circuit ... (vu qu'il reste un T.P. sur l'oscilloscope qui devrait en permettre la maîtrise ... et un sur l'amplificateur opérationnel, pour arriver aux 4 séances de T.P. conseillées).

A notre avis c'est ridiculement insuffisant face à un état initial comme ceux rencontrés jusqu'ici : même pas de modèle circulaire d'un circuit, boucle fermée où il circulerait des charges lorsqu'il est fermé, y compris à l'intérieur du générateur et où il ne circulerait rien, nulle part, dès l'instant où la boucle s'ouvre.

Notre séquence compte actuellement 12h de cours et 8 séances de T.P., ce qui permet une évolution appréciable des représentations, que l'on peut bien sûr tenter encore d'améliorer. Il est vrai que c'est un travail de recherche qui nécessite un maximum de traces écrites quelque peu consommatrices de temps. Néanmoins ces traces, très utiles pour le maître, sont également précieuses pour l'élève car elles contribuent à structurer sa pensée. En dehors d'un cadre de recherche, il nous semble :

- que l'horaire de T.P. est difficilement compressible, si on veut vraiment donner sa vraie place à l'expérience et le temps à l'élève de s'approprier la connaissance nouvelle mais
- une partie de l'horaire de cours pourrait être utilisée avec profit à d'autres réinvestissements, par exemple avec l'outil informatique qui permet de multiplier les situations beaucoup plus vite.

Conclusion : nos objectifs sont bien les objectifs officiels, mais ceux-ci semblent ignorer la lenteur de l'évolution des représentations humaines :

- en voulant ignorer qu'il ne suffit pas que l'élève ait rencontré une fois un concept dans une situation particulière, ou un modèle, pour qu'il se le soit approprié. Ce que l'élève a vu en 4°, dans le meilleur des cas il n'en reste rien en 2° ... et dans le pire il conserve une propriété rencontrée sur un exemple, cas particulier qu'il généralise de façon abusive...
- en proposant pour les concepts de circuit, circulation, d.d.p., intensité et circuit - système en interaction - un horaire d'environ 6h de cours + 2 T.P. soit 3h de T.P. sur un total de 9h d'enseignement, contre dans la séquence 12h de T.P. sur un total de 24h d'apprentissage !
- en résumant les expériences à des mesures pour vérifier des lois. Nous y cherchons l'éveil de la curiosité, une démarche scientifique, le raisonnement qualitatif, les analogies, la modélisation ... Aussi cet enseignement reste-t-il trop formel, contrairement à ses objectifs affirmés p.2 et p.74 : nous considérons qu'

« il favorise la recherche de recettes aux dépends de la compréhension. »

L'enseignant n'a pas les moyens horaires d'apporter à l'élève toutes les richesses d'une démarche scientifique, où les expériences sont l'occasion de remettre ses certitudes en question et de progresser sur le chemin de la compréhension de ce que font les physiciens comme du fonctionnement d'un circuit.

Nos objectifs reposent sur la nécessité de s'appuyer sur les structures cognitives et l'état réel des connaissances. Quels sont-ils ?

II - Observations lors d'essais préliminaires

1 – Questionnaire passé en fin d'année de troisième

Comme mémoire de tutorat (M.F.Missonnier, 1996 a), un questionnaire emprunté à J.L.Closset, rempli par 94 élèves de troisième et 91 élèves de seconde, complété par des entretiens, nous avait fourni l'opportunité d'observations surprenantes :

- certaines illustraient des raisonnements décrits par J.L.Closset (1983) et J.J.Dupin & S.Johsua (1986)
- d'autres révélaient des formes moins décrites, ou des conséquences non envisagées, d'un raisonnement souvent local ou séquentiel.

Nous avons cherché à en préciser l'existence, la nature et l'importance en passant un questionnaire dans deux classes de troisième, soit 60 élèves du lycée d'Arsonval à Brive, en fin d'année pour être sûr que les élèves aient reçu l'enseignement prévu sur l'électricité en collège. Il participait à un projet de recherche de DEA ayant pour finalité la conception d'une séquence d'électricité en classe de seconde (M.F.Missonnier, 1996 b). Les questions posées à cette population d'élèves en fin d'année de troisième cherchaient à préciser le stade d'acquisition par ces élèves des concepts de :

- circulation fermée :
 - o reste-t-il des traces des modèles unipolaires ou des courants antagonistes ?
 - o existe-t-il du courant quelque part en circuit ouvert ?
 - o arrive-t-il au courant de circuler en boucle à l'intérieur d'une dérivation ?
 - o circule-t-il du courant à l'intérieur de la pile, en circuit fermé ?
- intensité :
 - o quelle est son évolution le long d'une maille ?
 - o est-elle considérée comme une grandeur intensive au niveau d'un nœud ?
- tension : sont-ils capables de prévoir son existence entre deux points d'un simple circuit ?

Les réponses sont venues valider, si besoin en était, les travaux précédents. Nous avons retrouvé (M.F.Missonnier, 1996 b ; p.34) :

- les différents modes de raisonnement ;
- la circulation d'un fluide matériel et énergétique ;
- l'inexistence du concept de tension, notion vague non opérationnelle ;
- le raisonnement causal linéaire décrit par S.Rozier (1988) selon lequel un effet a une seule cause, aussi :
 - o pour qu'il circule un courant dans une portion de circuit, il faut un conducteur et un générateur, donc il circule un courant dans un fil relié d'un côté à une borne de la pile et de l'autre à un interrupteur ouvert ;
 - o pour qu'il existe une tension entre deux points, il faut un composant entre ces deux points, tel la pile, la résistance ou l'interrupteur, que le circuit soit ouvert ou fermé.

Par contre, nous avons été surpris par l'ampleur du nombre d'élèves faisant circuler un courant sur un tronçon de circuit ouvert : ils étaient 21 / 28 à trouver quelque part du courant sur un tronçon de circuit ouvert !

2 – Analyse des réponses recueillies (M.F.Missonnier, 1996 b)

Dans la mesure où nous cherchons à donner une importance déterminante à un apprentissage des contenus et à doter les élèves d'une compréhension minimale du monde environnant, notre analyse est centrée sur :

2 - a - Les concepts

- Le concept de d.d.p. peut être lié à l'existence d'un courant ou à la présence d'un composant entre les deux points (pp.29-32). Ceci « *confirme le malaise des élèves vis à vis du concept de d.d.p.. Ils tentent des associations plus ou moins heureuses avec d'autres concepts : intensité, résistance...* »
- Le concept d'intensité semble souffrir des mêmes associations, établies à partir d'un exemple et trop vite généralisées. » (p.33) La conservation du débit sur le circuit simple est prévue par la moitié des élèves (le questionnaire ne prévoyait pas de distinguer le raisonnement correct du raisonnement à courant constant), la loi des noeuds respectée par 80% et violée par 8%.
- Le concept de résistance est absent.

2 - b – La représentation du fonctionnement du circuit

Ces élèves développent le plus souvent des raisonnements partiellement circulatoires où la pile semble être un réservoir de charges traversé ou non par un courant (p.26). On rencontre :

- des **raisonnements unipolaires** ou apparentés chez les élèves qui prévoient du courant d'un côté de l'interrupteur ouvert, surtout si la lampe éclaire... ou dans un circuit série, à la question comment le modifier pour qu'une seule ampoule éclaire, Ana répond :

« une ampoule éclaire si la première est mal vissée. Dans ce cas elle éclaire comme si elle était seule car le courant n'a pas été ralenti avant. »

Cette réponse illustre une conséquence d'un raisonnement séquentiel... ;

- des traces d'un raisonnement avec **courants antagonistes**, telle Anne-Gaëlle :
« lorsqu'un interrupteur est ouvert, il lui arrive du courant des deux côtés, mais il s'arrête à partir du moment où l'interrupteur est ouvert » ;
- des raisonnements **locaux et séquentiels** (pp.26-30) qui sont autant d'aspects du raisonnement causal linéaire ;
- et 12 % de **sans réponse** sur le circuit simple, qui sont effectivement des élèves dépourvus de toute représentation au sujet du fonctionnement du circuit...

3 – Les connaissances de l'élève qui entre en seconde

3 - a – Les connaissances attendues à partir de nos analyses préalables

Les questionnaires passés de 1996 à 2000 en fin de 3^e comme à l'entrée en seconde nous ont fourni une représentation de plus en plus complète et précise des connaissances avec lesquelles les élèves abordent l'enseignement de l'électricité en classe de seconde. Voici quelques caractéristiques principales :

- la **grande hétérogénéité des représentations** des rôles des éléments ainsi que du fonctionnement du circuit généralement décrit en terme de courant et non à l'aide des concepts du physicien : l'intensité est susceptible de remplacer le fluide énergétique mais la d.d.p. et la résistance sont tout à fait ignorées de ces élèves ;
- quand ce n'est pas le vide en lieu et place de représentation, ce qui peut se manifester :
 - o par l'absence de réponse ou
 - o des réponses de mémoire qui ne prennent pas en compte les particularités de la situation proposée ;
- un niveau réel fort éloigné de celui attendu à la simple lecture des programmes, même éloigné de ce que laissait prévoir l'analyse de l'enseignement habituel :
 - o la majorité des élèves sont dépourvus d'un modèle de circuit, n'ont pas de modèle circulatoire ;
 - o les concepts du physicien sont absents.

Exemples d'**absence de modèle de circuit** à partir de réponses au questionnaire passé à l'entrée en seconde en 1998 :

- il peut exister des zones où il est question de **courant** alors que le **circuit est ouvert** :
 - o l'intérieur de la pile (27 / 68 élèves, soit 40 %), par exemple pour
 Emilie « *entre les deux bornes de la pile il y a toujours du courant* » (stocké)
 Laure « *les électrons sont en permanence en mouvement dans la pile* »
 Amélie « *il y a toujours de l'énergie dans la pile* » ou Aurélie « *le courant est à l'intérieur* »
 - o de part et d'autre de l'interrupteur BC ouvert (9 / 68 élèves, soit 13 %), expliqué par :
 Xavier « *le courant part du générateur et va jusqu'à B... Le courant part du générateur et va jusqu'à C, le courant se coupe en deux pour aller dans les deux branches.* »
 - o d'un seul côté de l'interrupteur BC ouvert (35 / 68 élèves, soit 51 %), justifié par exemple par :

- Julien « jusqu'au niveau de B le courant est présent, mais après, sachant que l'interrupteur est ouvert, le courant ne passe plus. »
- il peut aussi exister des **zones dépourvues de circulation** en **circuit fermé**, la plus fréquente étant l'intérieur de la pile (11 l'affirment et 13 s'interrogent), mais on peut également rencontrer :
 - o l'interrupteur (4 affirment « il n'y a pas de courant dans les interrupteurs » et 2 s'interrogent)
 - o les fils, telle Chloé : « le courant est toujours nul dans un fil »
 - o après l'ampoule (2 / 68 élèves) tel :
- Mathias « car l'énergie est utilisée par la lampe »
- sans parler de la **circulation bouclée** sur les branches dérivées.

Une explication vient du fait qu'ils se représentent un **courant statique**. Des entretiens ont confirmé l'absence de concept de circulation, un courant peut exister sans circuler :

Gaëtan : « il ne circule pas mais il y en a dans cette portion »

Morgan : « le courant est présent »

D'autres explications découlent d'une forme de raisonnement séquentiel, ainsi pour Emilie le courant peut « se fatiguer en courant », ce qui explique qu'il y en ait moins après l'ampoule...

Il existe d'autres raisonnements non circulatoires : des élèves pensent que le courant est partagé entre deux ampoules A et B montées en série jusqu'à écrire comme Said :

« A transforme la moitié des électrons en chaleur et B transforme l'autre moitié. »

Ces citations pour illustrer la **diversité des représentations** des élèves arrivant en seconde. Voyons maintenant leurs connaissances au sujet des **concepts**. Les explications privilégient le terme de courant : connaissent-ils l'**intensité** et que mettent-ils sous ce terme ? Nous avons essayé de comprendre l'origine du viol de la loi des nœuds. Elle nous paraissait intuitive mais peut-être ne mettons nous pas la même chose sous le terme intensité ? Aussi les avons-nous rencontrés en entretien et voici quelques unes des réponses recueillies :

Gaëlle :

- MFM « C'est quoi l'intensité pour toi ?
 G : C'est quelque chose... comment l'expliquer... la force avec laquelle le courant arrive »
- MFM Quel est pour toi l'effet d'une résistance sur cette force avec laquelle le courant arrive ?
 G : ça diminue parce que ça fait un obstacle...
- MFM L'intensité du courant, c'est quelque chose qui... caractérise quoi... ? les électrons... ?
 G : oui, c'est la vitesse à laquelle ils vont
- MFM C'est la vitesse à laquelle ils vont, donc pour toi ils vont à la même vitesse avant un nœud (en A) et dans chaque branche (en D et en E) ?
 G : oui. »

Nicolas :

- N : « Je pense qu'en dérivation le courant ne perd pas d'intensité »
- MFM C'est quoi pour toi l'intensité ?
 N : C'est le courant qui circule dans le circuit
- MFM C'est quoi le courant ?
 N : C'est l'énergie... c'est des électrons qui circulent
- MFM C'est quoi l'intensité de ces électrons qui circulent ?
 N : Je ne sais pas
- MFM Tu affirmes « c'est la même en A et en E... Qu'est-ce que tu mettais là dessous ?
 N : Je ne sais pas trop, je me base sur ce que j'ai appris l'année dernière. Je ne sais pas trop ce que c'est une intensité, mais je sais qu'en dérivation l'intensité ne change pas.
- MFM On quitte le mot intensité, dont apparemment tu ne sais pas le sens. Imagine que des électrons arrivent en A. Qu'est-ce qui leur arrive après à ces électrons ?
 N : Une partie qui passe en D et une partie qui passe en E : c'est la vitesse des électrons qui est la même
- MFM La vitesse des électrons qui passent en D est la même que la vitesse des électrons qui passent en E, est la même que la vitesse des électrons qui passaient en A ?
 N : Donc ça se divise, la vitesse restant la même. »

L'**intensité** est associée, dans l'esprit de ces élèves, aux notions de force (énergie ?) et de vitesse.

Quant à la résistance, ils ignorent son effet sur la circulation : elle peut être susceptible d'enlever du courant, de le bloquer, de l'affaiblir, de le ralentir ou de le retenir comme de l'amplifier... En début d'année de seconde, sur une classe, nous avons trouvé :

- 16 / 34 élèves qui prévoient une **diminution de l'intensité lorsque la résistance augmente** :
Gabriel « *La résistance sert à ne laisser passer qu'une partie du courant petit à petit* » et donc il y en a moins après... (raisonnement séquentiel) ;
- 11 / 34 qui prévoient le **contraire** :
François-Xavier « *la plus grande résistance a besoin de plus d'énergie pour s'alimenter* »
Céline « *R2 est plus importante que R3 donc il lui faut plus de courant* »
Rémi « *si on augmente la valeur de R elle supporte mieux les intensités plus hautes, alors le courant à la sortie est plus important.* »
- la **résistance peut retenir du courant** (3 / 34 élèves) ;
- certains lient encore plus clairement **résistance et énergie** :
Gaëtan « *Lors du passage dans la résistance, il y a une perte du courant électrique car la résistance en utilise pour fonctionner. La résistance a besoin de plus d'énergie pour fonctionner... elle a besoin de plus de courant.* »

La d.d.p. ne correspond à rien. Ils répondent avec des phrases toutes faites le plus souvent liées au courant ou des outils repris du cours et utilisés à plus ou moins bon escient.

3 - b – Conséquences sur nos choix concernant l'apprentissage

Ces constats illustrent le « *caractère délibérément opératoire et non conceptuel de l'enseignement actuel des circuits électriques.* » (S.Johsua, 1986) Or nous sommes à la recherche d'idées pour créer des lieux didactiques porteurs de sens qui entraîneraient l'adhésion, l'intérêt des élèves afin qu'ils se mettent au travail : nous aimerions qu'ils développent des initiatives, entrent en discussion et soutiennent des arguments de bon sens... Qu'ils réalisent que la vie de tous les jours et l'école appartiennent à un même univers, que la physique rend plus intelligible ce qui peut être source d'enthousiasme et de plaisir...

Nous venons de constater :

- la très grande diversité des représentations à l'entrée en seconde : nous recherchons une base commune de construction ;
- les explications à l'aide d'un fluide énergétique conduisant à un raisonnement séquentiel, ce qui nous donne envie d'explicitier l'aspect énergétique du circuit auquel ils sont sensibles :
Khadija et Saïd « *l'ampoule consomme du courant et cela devient de la lumière et de la chaleur* »
- l'absence de contenu du savoir, par exemple au niveau des concepts, même les plus simples tel celui de circuit ou de circulation nous conduit à nous tourner vers une approche à la fois qualitative et indépendante de chacun pour tenter de leur donner de la substance, du sens.

Nos objectifs d'apprentissage et nos observations lors d'essais préliminaires d'élèves entrant en seconde sont à l'origine des choix sur lesquels la séquence s'appuie, que nous allons expliciter.

III - Nos choix

Dans cette partie le chercheur prend la décision d'agir sur un certain nombre de variables non fixées par les contraintes, variables de commande jugées pertinentes à partir des analyses préalables. Il est amené à des choix didactiques pour la construction de la séquence. C'est une analyse du contrôle du sens, du contrôle des rapports entre sens et situations, démarche décrite par M.Artigue (1988, p.294) :

« *l'objectif de l'analyse a priori est de déterminer en quoi les choix effectués permettent de contrôler les comportements des élèves et leur sens. Elle va se fonder sur des hypothèses dont la validation sera en jeu... Cette analyse comporte une partie descriptive et une partie prédictive.* », mais aussi par S.Johsua (1985, p.3) :

« *bien que se présentant souvent comme une série d'« innovations », une expérimentation didactique s'en distingue par la précision de la problématique, la clarification des hypothèses directrices et surtout, par l'élaboration d'une analyse préalable des phénomènes attendus.* »

Nous allons expliciter nos hypothèses qui sont le fruit des analyses et des essais préliminaires. Ils ont permis, par une meilleure approche de la situation initiale, de fournir des éléments précieux pour la préparation des étapes de la séquence, de faire apparaître des hypothèses qui ont pu être partiellement étayées.

1 – la maîtrise des prérequis, dans le cadre de la pédagogie de la maîtrise

Lors des essais préliminaires, nous avons fait passer un questionnaire à tous les élèves entrant en seconde au Lycée d'Arsonval à Brive, soit près de 200 élèves. Il portait sur les acquis minimum attendus des élèves d'après les programmes du collège. Ces questionnaires qualitatifs leur ont permis d'exprimer leurs représentations et nous avons pu constater leur hétérogénéité et un état initial catastrophique, très loin de celui attendu : aucun concept n'est construit, même pas la notion de circuit, boucle fermée de conducteurs. Ces observations se sont renouvelées lors des expérimentations ailleurs en France.

Ces constats permettent d'affirmer que l'élève qui arrive en seconde ne maîtrise pas ce que les programmes officiels fixent comme objectifs d'apprentissage au collège. Dépourvus de représentation du circuit et de la circulation ainsi que des autres concepts à la base de l'électrocinétique on en vient à se demander comment la loi d'Ohm peut avoir un sens... Le programme de seconde comme référence d'enseignement suppose que ceux de 4^e et de 3^e soient acquis, sinon il n'a aucun sens. Tous les questionnaires passés font apparaître des savoirs disparates qui se cachent derrière la notion floue de courant : celui-ci peut « *se fatiguer en courant* » comme stagner dans les fils. La seule « base » commune pourrait être une sensibilité à l'aspect énergétique du courant.

Nos analyses préalables nous ont conduit à réfléchir à la **pédagogie de la maîtrise** : sa base principale est qu'il faut s'assurer de la **maîtrise des pré-requis** avant d'aborder tout nouvel apprentissage. Certaines connaissances étant essentielles pour en construire d'autres, il serait impossible de faire progresser des élèves aussi différents à partir d'un enseignement identique : si on les traite tous pareils cela ne pourrait qu'aggraver la dispersion cognitive.

Cette affirmation est cohérente avec les travaux de L.S. Vygotsky (1978) qui conduisent à concevoir un apprentissage par petits pas. Si l'enseignement rencontre des structures cognitives inhomogènes, il y aura celles qui seront aptes à le recevoir et celles pour lesquelles le gap sera trop grand. Les premières profiteront des apports de l'enseignement et progresseront alors que les autres stagneront ou même régresseront : c'est ce qui passe habituellement en classe. L'enseignant utilise un vocabulaire, emploie des outils (concepts) qui sont étrangers à certains élèves et dont ils ne peuvent tirer profit.

De l'ensemble des observations et analyses qui précèdent nous retiendront qu'avant chaque étape de la séquence nous aurons :

- à nous demander quels sont les connaissances utiles à la construction du savoir nouveau, puis
- à vérifier la maîtrise de ces pré-requis, sinon
- à homogénéiser la base sur laquelle s'appuiera l'apprentissage

ce qui se justifie parce que l'on ne sait progresser que si le gap n'est pas trop grand.

2 – Une approche énergétique du circuit

L'analyse des réponses à des questionnaires passés par des chercheurs tels J.L. Closset (1983), S. Johsua (1982) ou D.M. Shipstone (1988) comme celles de nos élèves à l'entrée en seconde, a fait ressortir une majorité de justifications en termes d'énergie :

« Les élèves utilisent un concept qui est souvent appelé courant ou énergie et a des propriétés de mouvement, stockable et consommable », « quelque chose, que les élèves appellent ordinairement courant, énergie ou électricité est emmagasiné dans la pile au moment de sa fabrication. Ce courant est transféré d'une pile à une ampoule en passant par un ou deux fils. Pour briller l'ampoule consomme du courant. » (P. Koumaras, P. Kariotoglou & D. Psillos, 1994)

Lors d'expérimentations avec un fer à repasser, à une question mécaniste de type : « comment ça marche ? », la seule perception qu'ils en aient (J.L. Closset, 1983 ; p.191) est en terme d'énergie, mais avec leur énergie à eux, substantialisée. La question de l'élève pourrait être :

« comment y a-t-il de l'énergie dans la pile et comment se retrouve-t-elle dans la lampe ? »

L'analyse de l'élève se ferait en termes d'énergie, alors que l'enseignement traditionnel suit une logique propre sans se soucier de la question de l'élève. Nous pensons qu'une recherche d'explication, puis la réponse à sa question, pourrait faire naître une motivation, alors que l'ignorer entraîne le désintérêt. On peut imaginer que l'élève attendant une réponse à sa question, pense que le maître la lui fournit quand il parle de courant, et pour l'élève courant et énergie seraient deux termes équivalents. Ce « courant énergétique » irait de la pile vers

l'ampoule par les tuyaux que sont les fils, puis dans l'ampoule où il s'userait ce qui donnerait une forme de raisonnement séquentiel avec usure du courant.

Ce raisonnement de type causal linéaire leur est familier : si on veut l'éviter, nous jugeons qu'il est nécessaire de répondre à leur question, au comment ça marche en termes d'énergie. C'est ce que conseille J.L. Closset (1983, p.232) : **raisonner en terme de bilan d'énergie est une base favorable à exploiter...** la démarche consistant non à détruire les représentations, mais à s'appuyer dessus pour construire l'apprentissage.

Une fois les concepts de circuit et de circulation en place, nous faisons l'hypothèse que régler le problème de l'énergie, répondre à la question de l'élève lui libère l'esprit pour autre chose, le débarrasse de sa question. Nous faisons l'hypothèse qu'une approche énergétique permet de répondre à un questionnement implicite de l'élève, auquel l'enseignement traditionnel ne répond pas : nous comptons la tester en abordant le fonctionnement du circuit par une approche énergétique et mécaniste, pour qu'ils s'en fassent une image concrète. Nous nous appuyons sur les travaux de J.L. Closset, S. Johsua et D. Shipstone, ce dernier ayant montré que le modèle à épuisement de courant disparaît partiellement dès que l'aspect énergétique est introduit, il nous semble intéressant de tenter l'expérience.

3 – Une approche qualitative des concepts

Nous avons été frappé par l'absence de pertinence, de signification des différents concepts chez les élèves, et nous sommes décidés à agir pour que l'élève leur donne un contenu. Comment ? Nous avons retenu deux suggestions qui seront nos dernières hypothèses.

Les réponses aux questionnaires préliminaires nous ont montré que les élèves n'ont aucune compréhension de ce qui se passe, même une représentation d'un circuit et de quelque chose qui circule est inexistante pour certains. Dans une telle situation, la stratégie qui s'impose est de tout reprendre... mais autrement ! Lors de l'analyse de l'enseignement usuel, nous avons vu qu'il est basé sur l'hypothèse que la mesure d'une grandeur inconnue permet de la conceptualiser. Dans ce contexte J.L. Canal (1996, p.20) écrit :

« Il nous semble que nous sommes face à un des obstacles majeurs de l'apprentissage de l'électricité : celui d'attribuer à l'acte de mesure un pouvoir qu'il n'a pas... La connaissance du mot désignant la grandeur, la valeur de sa mesure, n'apportent rien à la construction du concept... Proposer des situations qui les amène à donner du sens à la grandeur mesurée. »

Lors de nos analyses préalables nous avons rencontré de nombreux chercheurs favorables à un enseignement d'abord qualitatif, étape qui selon eux doit précéder tout formalisme :

« Aujourd'hui on considère que l'on ne peut enseigner que ce que l'on peut habiller d'un formalisme mathématique... or dans un premier temps l'enseignement de la physique devrait être fondé sur l'observation, donc qualitatif et illustratif. » (P. Bergé, 1997).

Les observations de J.L. Closset ont montré que même au niveau universitaire les étudiants se réfugient dans un formalisme mathématique qui bloque toute tentative de compréhension du phénomène physique. Il serait téléguidé par le raisonnement naturel, auquel il donnerait un vernis scientifique et servirait à justifier l'erreur.

L'idée n'est pas neuve, puisque J. Piaget (1967) écrivait déjà :

« seule la conceptualisation qualitative de la grandeur autorise le passage au quantitatif. »

Pour tenter de donner sens aux concepts, notre enseignement commencera par une **approche qualitative** : cette approche qualitative devrait amener les élèves à construire, par approches successives, pas à pas, les concepts. Nous en avons exploité un autre intérêt, lors des questionnaires préliminaires qualitatifs. Ils ont permis aux élèves d'exprimer leurs représentations et par là même au maître de les connaître et de pouvoir en tenir compte dans la conception de son enseignement. Nous pensons que la physique est là pour rendre compte du phénoménal, d'abord en répondant à des questions qualitatives : elles seules, permettent la construction des concepts, sans approche qualitative on ne s'appuie sur rien. Il nous semble qu'un enseignement raisonné, comme celui que nous voulons mettre en place, qui répond à une quête naturelle de sens, ne peut se faire sans une approche d'abord qualitative. Nous partageons l'idée de J.L. Closset (1983) selon laquelle :

« un enseignement qualitatif permet aux élèves (et à leurs enseignants) de comprendre le mode de fonctionnement des systèmes en cause, de répondre au comment ça marche avant d'aborder le formalisme. »

Nous faisons l'hypothèse qu'une introduction qualitative permet de construire un modèle du circuit, de dire comment ça marche.

4 – Une introduction indépendante et progressive des concepts

Nos analyses préalables concernant la nature de la connaissance scientifique et son apprentissage nous ont conduit à un autre contrat didactique dont un aspect consiste à mettre l'élève dans une démarche de recherche de signification. Dans ce contexte il nous apparaît difficile d'arriver à introduire à la fois progressivement et ensemble les différents concepts. Ce sera notre dernière hypothèse. Chaque étape devant répondre à une question, on peut penser fournir à la question posée la réponse la plus simple, faisant intervenir le minimum de données nouvelles, juste ce qu'il faut pour arriver à une nouvelle étape. On peut imaginer chaque étape dans l'un des champs décrits par G.Lemeignan et A.Weil-Barais (1993, p.63-64) :

- questionnemental : objets, actions, événements, questions ;
- représentations mentales : propriétés et relations invariantes constitutives des concepts, ce que l'élève doit avoir en tête lorsqu'il emploie le concept ;
- représentations symboliques qui servent à communiquer et à faire travailler le concept ;
- pour finir par les relations entre concepts.

Mais nous tenons à une introduction initialement indépendante afin de donner sens à chacun pour lui-même. Ce n'est pas la volonté de découper la réalité en tranches, mais celle :

- de n'apporter les informations que peu à peu et seulement en réponse à une attente ;
- et d'aider l'élève à se donner une représentation de chacun avant de les mettre en relation, ce qui enrichira ultérieurement les concepts reliés.

Nous faisons donc le choix d'une **introduction progressive et séparée** des différents concepts de l'électrocinétique, concepts en particulier de différence de potentiel, d'intensité et de conducteur résistant, ce qui a pu être la démarche historique. Nous pensons surtout que cela permet d'agir au niveau de la signification en donnant du sens à chacun pour lui-même, parce qu'ils doivent apparaître par nécessité, en réponse à une question, c'est à dire permettre face à une question d'expliquer un aspect du fonctionnement d'un circuit. Une fois construit un premier début de conceptualisation, on peut alors imaginer l'enrichir :

- de relations aux autres concepts connus dans une représentation systémique du circuit ;
- jusqu'à une dimension formelle ;
- en l'impliquant dans la loi d'Ohm, point d'orgue du travail envisagé.

Ce choix s'accompagne d'un ordre d'introduction qui ne sera pas laissé au hasard mais justifié lorsque nous expliquerons les conséquences de nos choix sur le déroulement de la séquence.

IV – Conséquences de nos choix sur le déroulement de la séquence

1 – Conséquences de nos choix sur le plan de la séquence

1 - a – 1^o Hypothèse : la maîtrise des pré-requis

Cette hypothèse repose sur le constat établi lors d'études préliminaires d'une très grande hétérogénéité des savoirs des élèves à la sortie de la classe de troisième et sur des travaux suggérant que l'on réduit significativement la dispersion des résultats à l'arrivée si l'on assure la maîtrise des pré-requis au départ.

On attend une diversité de représentations, en particulier dans les domaines qui ne font pas explicitement partie des programmes antérieurs, comme les concepts de circuit et de circulation. Ils nous apparaissent pourtant comme des points d'ancrage indispensables dans le cadre d'un essai de compréhension de l'électrocinétique. C'est pourquoi il nous apparaît nécessaire, dans le cadre décrit ci-dessus, avant d'aborder l'électricité, de faire exprimer aux élèves ce qu'ils mettent sous les mots circuit et circulation. En effet, tous les programmes semblent considérer cette étape comme superflue, un accord tacite serait établi... or les questionnaires et entretiens ont révélé :

- un circuit électrique trop rarement bouclé à l'intérieur du générateur, et
- une circulation qui n'est pas toujours associée à l'idée d'un mouvement.

La séquence débute par un questionnaire préliminaire à tout enseignement ayant pour objectif :

- de faire exprimer par les élèves leurs représentations, occasion pour
 - o l'enseignant d'avoir accès aux représentations

- pour l'élève de prendre conscience de sa représentation, puis lors d'une mise en commun, de l'existence d'autres, et alors
- de les considérer comme des hypothèses scientifiques qui seront mises à l'épreuve du débat scientifique (échanges entre pairs) et de vérifications expérimentales **afin d'établir une base commune** avant enseignement, c'est à dire **d'homogénéiser le point de départ**, en associant :
 - au **circuit**, l'image d'une boucle fermée y compris à l'intérieur du générateur, et sa réciproque, l'impossibilité de passage d'un courant dès que le circuit est ouvert ;
 - au **courant électrique**, l'idée d'un mouvement dans un sens, qui resterait à préciser.

Cette hypothèse conduit à envisager un enseignement établissant les notions qui nous sont apparues indispensables pour la construction de savoirs en électrocinétique. Cette première étape constitue un avant programme qui assure pour la suite un début de représentation du fonctionnement du circuit, exprimé à l'aide d'un vocabulaire commun minimum. On peut ensuite envisager un enseignement sur cette base minimale maîtrisée par quasi 100 % des élèves, base proche de la situation réelle dont nous avons mesuré combien elle diffère de la situation officielle.

Cette maîtrise sera à vérifier avant chaque nouvelle étape de la séquence : nous en reparlerons avec l'influence des choix sur la démarche d'apprentissage.

1 - b – 2° Hypothèse : une première approche énergétique du circuit

Les questionnaires, en révélant que des élèves considèrent le courant électrique comme un flux d'énergie consommable, ce qui est compatible avec le langage usuel, tel : « cet appareil consomme du courant... », n'ont fait que confirmer de nombreux travaux.

Nous avons choisi, pour répondre au questionnement supposé de l'élève, établi à partir de ses réponses, de commencer par aborder le circuit en traitant son aspect énergétique. Ce choix nous conduit à un nouvel enseignement hors programme : une fois les concepts de circuit et de circulation en place, pré-requis incontournables à nos yeux, nous approchons le fonctionnement du circuit du point de vue des aspects de l'énergie auxquels l'élève est sensible : son lieu de stockage, ses lieux de transformation et son transfert d'un lieu à un autre. Nous parlons du circuit comme d'un système où s'effectuent des échanges énergétiques.

Ce choix de démarrer une approche du fonctionnement du circuit en réglant la question implicite de l'élève au niveau de l'énergie nous a conforté dans le choix d'utiliser comme **analogie** du circuit :

- un système mécanique familier (pour répondre au besoin de concret)
- qui réponde au besoin fondamental d'explication (J.Piaget, 1967)
- qui soit le **siège d'échanges énergétiques**.

Cette analogie, suggérée par J.L.Closset(1983), est la chaîne de vélo. Expérience faite, passé l'effet de surprise, elle fut bien accueillie et surtout remplit sa fonction : elle permet, par exemple, comme nous le verrons dans la démarche d'apprentissage, d'illustrer le rôle des différents éléments en lien avec l'énergie.

1 - c – 3° Hypothèse : une première approche qualitative

Pour éviter la réduction de la physique enseignée à un formalisme dépourvu de signification, pour aider à la construction d'une véritable compréhension des phénomènes, nous avons fait le choix de construire les concepts à partir d'une approche qualitative. Nous passerons ensuite au symbolisme (qu'ils connaissent, en fait, mais auquel ils peuvent alors attribuer une signification physique) et enfin à un formalisme qui, ayant été piloté par le travail qualitatif d'approche, a du sens.

Cette hypothèse ajoute, par rapport à l'enseignement habituel, un temps de familiarisation avec un travail de prévision ou de justification qualitative à chaque étape d'apprentissage. Elle ouvre la porte à l'utilisation des aides cognitives que peuvent constituer les analogies : elles peuvent illustrer une explication ou permettre de prévoir le fonctionnement d'un nouveau circuit.

1 - d – 4° Hypothèse : une approche indépendante des concepts

Cette introduction indépendante et progressive des concepts est de nature, au travers d'une construction qualitative d'abord, à leur conférer du sens et à permettre une représentation fonctionnelle du circuit. Cette hypothèse est à l'origine du plan de la séquence.

Après les concepts de circuit et de circulation, les transformations et les transferts d'énergie au sein du circuit, nous en venons aux autres concepts. Nous voulons une introduction à chacun d'abord qualitative : après une définition, les élèves auront à leur attribuer des propriétés avec l'aide, entre autres, d'analogies.

Mais dans quel ordre ? Nous avons retenu deux idées :

- « *La tension est présentée avant le courant car dans le modèle enseigné elle est la cause de l'intensité du courant* » (A.Tiberghien, G.Arsac & M.Méheut, 1994)
- L'ampoule a un double rôle d'utilisateur d'énergie et de chemin pour le courant. L'utilisateur d'énergie appartient aux représentations des élèves, l'autre pas. Pour aider les élèves à donner un sens aux deux phénomènes P.Koumaras, P.Kariotoglou & D.M.Psillos (1997) font précéder l'enseignement de la résistance par celui du courant, ce qui permet d'introduire une interprétation mécanique du rôle de la résistance : chemin pour le courant et transformateur d'énergie.

Après avoir assuré la construction des pré-requis jugés indispensables, la séquence s'est déroulée avec pour **plan** :

1 – la **d.d.p.** qui a été choisie comme premier concept pour :

- son rôle causal, comme expliqué plus haut ;
- son lien à l'énergie, base difficile mais qui doit être exploitée (J.L.Closset, 1983) ;
- sa difficulté : en introduisant ce concept au début, nous comptons nous en servir le plus possible afin qu'il prenne place dans les raisonnements, qu'il acquiert peu à peu une utilité, voire même une nécessité... pour expliquer l'éclairement comparé d'ampoules montées en série ou en dérivation, ou encore toute évolution d'un circuit. Nous avons eu présent à l'esprit les recommandations de R.Millar (1993) de considérer :
 - o des dipôles montés en série comme des diviseurs de tension ;
 - o des dipôles montés en dérivation comme des circuits indépendants.

2 – Ayant un circuit fermé et une cause à une circulation, on peut imaginer de préciser cette circulation avec des prévisions, observations et interprétations toutes qualitatives. Notre analogie devrait nous permettre d'avoir une première idée concernant la circulation, à savoir partout la même dans un circuit série. Ensuite nous nous intéressons à ce qui reste invariant : est-ce la vitesse ou le débit ? Les physiciens ont choisi pour **concept d'intensité** le débit qui est invariant le long d'un circuit série.

Une fois bâtie cette ébauche, en ayant présent à l'esprit le raisonnement à courant constant que nous aimerions déstabiliser, nous avons fait évoluer le circuit par ajout ou retrait de récepteurs en série ou en dérivation et demandé des prévisions, des observations puis des interprétations... pour tenter une évolution des représentations vers le raisonnement du physicien.

3 – Les évolutions du circuit permettent, outre le constat que l'intensité traversant le générateur est susceptible de variations, une première rencontre qualitative avec le concept de « **conducteur-résistant** ». en modulant un circuit, on s'aperçoit qu'en ajoutant ce dipôle :

- en série, on ajoute un frein à la circulation. Il existe des conducteurs très performants, les fils, et d'autres qui le sont moins, qui freinent ;
- en dérivation, on lui offre un chemin supplémentaire.

Cette approche qualitative du concept prépare la résistance équivalente.

4 - Ce travail qualitatif met peu à peu en relation les différents composants du circuit, et le fait de faire évoluer les circuits conduit l'élève à constater que toute modification, si minime soit-elle quelque part, entraîne en tout point du circuit. On arrive à un nouveau concept, également illustré par l'analogie de la chaîne de vélo, celui de **l'interaction** des différents éléments du circuit, qui peut se résumer par cette phrase de J.L.Closset : « *tout ce qui se passe dans le circuit, la pile le sait.* »

Cette interaction relie les deux relations causales mises en évidence par D.M.Psillos (1997), c'est à dire une relation agent-patient ou l'agent est soit :

- la pile qui impose un courant constant à l'ampoule ;
- l'ampoule qui demande ce qu'il lui faut et l'impose à la pile

en une sorte de relation causale bouclée.

Elle est surtout une préparation à la **loi d'Ohm**, superbe synthèse du fonctionnement du circuit électrique, système composé d'éléments en perpétuelle interaction, mais qui ne peut être perçue comme telle qu'après un long et pénible cheminement à la recherche d'interprétations de phénomènes observés, si souvent différents de ceux prévus.

Remarque : les deux premières hypothèses font apparaître la nécessité d'enseignements ne figurant pas au programme officiel de la classe de seconde. La troisième hypothèse nécessite des étapes d'apprentissage qualitatif avant de passer au symbolisme puis aux formules. En résumé toutes ces hypothèses conduisent à envisager la nécessité d'**allonger**, par rapport au temps officiel, le **temps consacré** à la construction des concepts à la base de l'électrocinétique si l'apprentissage se limite à la classe de seconde, mais en fait permettrait de le raccourcir si on tient compte du temps déjà consacré à électricité au collège, sans construction de concept...

2 – Conséquences des choix sur la démarche d'apprentissage

Ces hypothèses en lien direct avec les connaissances actuelles sur l'apprentissage conduisent à envisager une démarche différente dans le cadre d'un autre contrat didactique déjà précisé. Nous allons expliciter l'influence de chacune :

2 - a – 1° Hypothèse : maîtriser les pré-requis

Nous avons développé l'incidence de cette hypothèse avant le premier enseignement portant sur l'électricité, qui conduit à construire les fondations sur lesquelles pourra reposer la suite de l'édifice. Mais ce n'est pas parce qu'il y a eu un enseignement que tous les élèves sont en possession de ce savoir. On peut facilement imaginer qu'il restera toujours des élèves qui sont passés à côté ou qui n'ont pas encore acquis une maîtrise suffisante et pour lesquels l'outil fourni reste inutile et inemployé.

Nous ne comptons pas les abandonner en chemin : notre stratégie a été de leur tendre deux perches successives, sous la forme d'un questionnaire intitulé « réinvestissement », puis d'un test. Chaque nouvelle séance d'apprentissage veut **fournir des occasions de comprendre**, ou plus exactement devrait permettre de renforcer pour ceux pour qui c'est acquis, et de fournir une occasion supplémentaire d'apprendre pour les autres. C'est pourquoi, le questionnaire « **réinvestissement** » reprend toujours l'étape précédente sur une autre situation-énigme (nécessitant la même démarche) et prépare l'étape suivante :

- la reprise de l'étape précédente est l'occasion pour ceux qui ont passé le cap de voir leurs prédictions se réaliser, et la confirmation qu'ils ont compris. Ils passent à l'étape suivante qui teste de nouvelles situations, occasion de décontextualiser le savoir et d'étendre son domaine de validité ;
- et pour les autres, elle est l'occasion de constater que leurs représentations ne leur permettent toujours pas d'interpréter les phénomènes, ce qui les remet en quête d'une explication... chacun progressant à partir du niveau où il se trouve, mais aussi en fonction de sa capacité, à cet instant, à remettre en cause ses convictions...

Par ailleurs, les pré-requis, dont nous avons vérifié la maîtrise, seront à contrôler avant tout nouvel enseignement. Le test est là pour mesurer le degré de maîtrise avant de passer à la suite. Sa correction est une nouvelle occasion de remédiation pour ceux qui ne possèdent toujours pas le savoir visé par l'apprentissage.

Dans l'idéal, il conviendrait de prévoir d'autres moyens pour ces « retardataires », tels des entretiens... qu'il ne nous a pas été possible de réaliser pour des raisons d'incompatibilité d'emploi du temps entre celui de l'enseignant et celui de la classe.

Cette stratégie mise au point dans le cadre de la pédagogie de la maîtrise offre un maximum d'occasions de comprendre. Ce dispositif cherche à ne pas pénaliser les « bons » pour qui les réinvestissements sont des occasions de renforcement. **Chaque étape d'apprentissage s'est déroulée en trois temps :**

- un **questionnaire préliminaire** qui a permis de vérifier le niveau de maîtrise des prérequis, par exemple que se cache-t-il sous le mot intensité : une vitesse, un nombre, une énergie, un débit... ? Ils investissent ces représentations dans des prévisions mises ensuite en commun, ce qui permet de dégager les hypothèses en présence, de les tester, de les faire travailler dans des situations différentes pour en tirer
- une **loi commune à réinvestir** une première fois, avec le questionnaire « **réinvestissement** » qui est l'occasion pour les uns de mieux en percevoir la portée, le domaine de validité, et de repêcher les autres ;
- une **deuxième fois lors du test**, nouvelle perche tendue pour établir une nouvelle base commune pour la suite...

2 - b – 2° Hypothèse : une approche énergétique

Nous avons évoqué l'incidence de cette hypothèse qui conduit à traiter le problème de la « consommation » de l'énergie au sein du circuit. Cette sensibilité des élèves, qui transparait à la lecture de leurs justifications avant enseignement n'est pas étrangère au **choix de nos analogies**. Nous avons privilégié des systèmes ou des situations où se produisent des échanges énergétiques :

1 – l'analogie gravifique : elle établit une comparaison entre altitude et potentiel, ou si l'on préfère entre différence d'altitude et différence de potentiel. Ainsi des points considérés au même potentiel seront dessinés à la même altitude c'est à dire sur la même ligne horizontale. L'existence d'une différence d'altitude (électrique) ou d'une différence de potentiel électrique entre deux points est reliée à la possibilité d'un échange énergétique entre ces deux points pourvu qu'il existe un chemin entre eux et un « objet » susceptible de l'emprunter.

Ainsi la possibilité d'un échange d'énergie est reliée à l'existence d'une différence de potentiel électrique (et non à l'intensité du courant).

2 – La chaîne de vélo peut être considérée comme un système mécanique analogue au circuit électrique. Nous savons que comprendre exige plus qu'un mot, « *qu'une simple allusion à un système que l'on ne fait pas fonctionner* ». Cette analogie permet, comme nous allons le voir, de rendre compte d'un maximum de comportements du circuit, même si elle ne peut tout expliquer à elle seule, ou se trouve délaissée après usage... Lors des essais, elle est apparue comme une étape utile, un outil fort précieux : il est arrivé à des élèves de 1^oS de la mettre en oeuvre pour expliquer à leur voisin un phénomène inattendu... Voici, pour illustrer notre propos, quelques aspects de cette analogie :

- la chaîne exige pour fonctionner d'être complète, fermée comme le circuit : en l'absence de fermeture la liaison entre le pédalier et la roue n'existe plus, aucun mouvement possible nulle part...
- la chaîne est une courroie de transmission, formée de maillons qui ne sont pas consommés, pas plus que les électrons du circuit...
- dans ces deux systèmes il y a une source d'énergie, un transfert et une consommation... sans consommation de matière...
- le déplacement d'un maillon est lié à celui du précédent et entraîne le suivant comme pour les électrons. Dans le cadre d'une transposition didactique, qui ne peut être pensée qu'au niveau le plus élémentaire possible au regard de l'état initial, nous avons admis que :
 - o si ça circule en un point, ça circule partout, et partout à la même « vitesse » (en réalité, la vitesse n'est pas constante, mais en première approche on part de leur vocabulaire, puis dans un deuxième temps, on introduit le débit), en fait avec le même débit, ce qui prépare le concept d'intensité, et un travail sur le raisonnement séquentiel ;
 - o ce qui met en mouvement la chaîne, c'est le pédalier, comme la pile pour les électrons. Il existe donc une relation entre pédalier et roue, comme entre pile et ampoule : on prépare le concept d'interaction.

2 - c – 3^o hypothèse : une approche qualitative

Si la construction des concepts étudiés repose sur une approche qualitative qui leur donne sens, on émet l'hypothèse qu'ainsi on évite la réduction de la physique enseignée à son seul formalisme et on permet la construction d'une véritable compréhension des phénomènes. Quelle influence sur la démarche d'apprentissage ?

L'approche qualitative des concepts se retrouve au niveau :

1 – des questionnaires préliminaires : le premier questionnement et les premières **observations** sont **qualitatifs**. C'est pourquoi le récepteur le plus utilisé est l'ampoule dont l'éclairement est en lien direct avec l'intensité qui la traverse. L'observation de son éclairement évite toute mesure :

« l'ampoule éclairera-t-elle plus ou moins quand on modifie tel ou tel point du circuit ? »

2 – du choix des aides, analogies ou images, supports concrets pour la pensée, que l'on fait travailler dans le domaine qualitatif. Par exemple l'analogie entre le circuit et la chaîne de vélo permet d'établir des parallèles entre éléments en mouvement décrivant une boucle fermée, de parler de lieux de transformation de l'énergie, de transfert d'énergie d'un transformateur à un autre, d'interaction entre ces transformateurs... autant d'images mentales qualitatives qui permettent de se construire une représentation du fonctionnement du circuit utiles pour prévoir son comportement ou expliquer des observations.

3 – du travail effectué avec le résistor : en recherchant l'effet de l'ajout d'un tel dipôle en série ou en dérivation, on s'aperçoit que l'on ajoute un frein ou bien que l'on propose au courant un chemin supplémentaire.

Ce composant peut alors porter le nom de « **conducteur-résistant** » ce qui illustre les deux facettes de son comportement.

Les exemples précédents décrivent un travail qui se fera souvent sur un circuit que l'on fera évoluer, avec demande de prévisions quant à l'effet de la modification sur le reste du circuit. Ce travail sur des **circuits évolutifs** est aussi qualitatif : l'ampoule éclairera plus, moins...

Questionnements et observations sont d'abord, et pendant l'essentiel de la séquence, qualitatifs avant tout symbolisme et passage au formalisme.

2 - d - 4° Hypothèse : une approche progressive et indépendante des concepts

Nous pensons qu'une introduction indépendante et progressive des concepts est de nature, au travers d'une construction qualitative d'abord, à leur donner du sens et à faciliter par la suite, leur mise en relation nécessaire à la compréhension des mécanismes régissant le fonctionnement du circuit.

Cette hypothèse est à l'origine du plan de la séquence : pour chacun des concepts une première approche qualitative, une définition, puis l'attribution de propriétés par les élèves aidés par des analogies.

Nous avons choisi d'introduire les concepts par nécessité, en réponse à une question :

1 - La différence de potentiel : en « avant -programme », les concepts de circuit / circulation permettent de poser l'existence d'une boucle conductrice avec des électrons mobiles à l'intérieur. L'analogie de la chaîne de vélo peut amener les questions :

« que faut-il pour que la chaîne tourne ? »...

exercer une force directement sur la chaîne... ou sur les pédales ;

« que faut-il pour que les électrons prennent un mouvement d'ensemble ordonné ? » ...

quelque chose qui les pousse, une force.

C'est pour le maître l'opportunité d'un apport : oui, dans le circuit il existe une cause au mouvement des électrons, cause située au niveau de la pile. Cette cause a été appelée par Volta « force électromotrice » de la pile. De même un objet libre dans le champ de pesanteur terrestre se déplace s'il existe une différence de hauteur sous l'effet d'une force dite de pesanteur. La pile :

- exerce une force électromotrice sur les électrons car elle
- établit une différence de hauteur électrique qui est à l'origine d'une force et de la mise en mouvement... et donc d'un échange énergétique : les électrons dégringolent la différence d'altitude, ce qui ne peut se faire que si une différence de hauteur existe : il en existerait donc une aux bornes de tout conducteur placé dans un circuit... à vérifier par des mesures.

2 - L'intensité viendra préciser la circulation des électrons et les facteurs qui l'influencent. Notre analogie nous a permis de distinguer flux de charges et flux d'énergie. Ce concept est d'un accès un peu plus facile mais nous avons jugé important, après un échange, d'en donner une définition afin de clairement préciser ce qui est invariant, le débit et non la vitesse.

Puis ce concept s'est trouvé enrichi par attribution de propriétés par les élèves. Celles concernant le circuit série ont été illustrées ou prévues avec l'analogie de la chaîne de vélo. En faisant évoluer le circuit nous avons cherché une évolution des représentations concernant la pile « au débit constant ». Le circuit avec dérivation et une nouvelle occasion de remettre en cause cette représentation tenace, mais aussi de poser la question de ce qui se passe à un nœud : la loi des nœuds, qui paraît intuitive, mais qui se trouvait rejetée par certains, peut conduire à comparer un tel circuit avec d'autres circulations : eau, automobile...

3 - Le « conducteur-résistant » régule le débit : son effet diffère selon qu'il se trouve introduit en série ou en dérivation... nous en avons déjà parlé...

4 - En conclusion, il reste à les réunir dans le **circuit**, système en équilibre, équilibre réalisé par l'interaction des éléments qui le constituent : toute modification de l'un quelconque a une influence sur tous les autres et aboutit à un nouvel équilibre... Là encore l'approche est qualitative, même si elle se résumera par la loi d'Ohm ou de Pouillet, lois qu'il convient de faire travailler qualitativement pour mieux en mesurer le domaine de validité et le sens.

V – Analyse a priori des effets attendus de ces choix

Quelles observations s'attend on à faire en lien avec ces hypothèses ? Quelles sont les conséquences attendues des hypothèses sur les processus d'apprentissage ?

Cette séquence s'appuie sur un ensemble d'hypothèses entre lesquelles peut exister un lien logique. C'est pourquoi certains effets peuvent provenir de la mise en oeuvre simultanée de plusieurs d'entre elles. La séquence cherche à donner du sens à l'apprentissage, en partant de pré-requis connus, par une approche énergétique et qualitative de chaque concept pris séparément. Aussi nous rechercherons :

- quelques effets spécifiques de chaque hypothèse, ainsi que
- les **effets cognitifs** attendus qui, s'ils se manifestent, seront le **produit** du mélange détonant employé, c'est à dire de notre « **bouquet d'hypothèses** ».

1 – Recherche d'effets plus spécifiques

1 - a – Effets en lien avec la maîtrise des pré-requis

En assurant l'homogénéité des pré-requis au départ, les bénéfices de la pédagogie de la maîtrise seraient :

- une **augmentation du niveau de maîtrise** des objectifs poursuivis par l'enseignement ;
- une **réduction significative des différences interindividuelles** à l'arrivée.

Construire sur une base commune, permet à un plus grand nombre de comprendre ce qui se déroule en classe. En conséquence annexe, on peut penser améliorer par une modification affective, issue d'un enseignement différencié et de la réussite des premières étapes, le degré d'investissement et de motivation des élèves pour l'étude.

On s'attend à pouvoir observer :

- l'évolution du **niveau de maîtrise** des concepts chez les élèves de la séquence (référence interne) et le comparer à celui d'autres élèves (point de repère externe) ;
- une **évolution de la dispersion des représentations** dans la population concernée par la séquence : sera-t-elle moindre en fin d'enseignement qu'au début ? (éléments de la validation interne)

Exemple : nous avons observé, à chaque essai de séquence, avant enseignement une parfaite hétérogénéité, avec absence de maîtrise des éléments de base les plus élémentaires. Ces mêmes observations nous ont conduit à procéder à un enseignement des pré-requis tels :

- les concepts de circuit et ensuite de circulation ;
- la vérification d'une maîtrise de la lecture d'un schéma (noeud, dipôles en série ou en dérivation), et de la reconnaissance des composants (ampoules, générateur et surtout interrupteur ouvert ou fermé),

avant toute approche de l'un des concepts U ou I ou R. Suite à cet enseignement, on peut observer quel est le taux de maîtrise de :

- l'absence de circulation en circuit ouvert ;
- la circulation en circuit fermé, et même le mode de raisonnement à son sujet.

Ensuite, le réinvestissement propose d'autres situations de circuit ouvert (ampoules grillées, diode à contre sens...), occasions de remédiation pour les élèves pour lesquels persiste une circulation en circuit ouvert.

Sur cet exemple, un **essai de validation** pourrait être de chercher le taux d'existence d'une circulation en circuit ouvert dans la population ayant suivi la séquence qui serait comparé à ce qu'il est pour les autres élèves de même niveau d'étude (repère externe).

Cette maîtrise des bases utiles au nouvel apprentissage permet à l'élève de comprendre de quoi on parle, de se sentir concerné par ce qui se passe. A partir de là on peut imaginer que la question ne lui est pas étrangère, puisque c'est la sienne, et l'engagera dans une recherche de signification. On peut en attendre une plus grande motivation, une meilleure **implication des élèves** dans la tâche d'apprentissage, un réel travail sur leurs représentations et donc un progrès cognitif. L'intérêt de cet apprentissage vécu par l'élève peut être en partie estimé par une évaluation de la séquence par les élèves, en fin d'année.

1 - b – Effets en lien avec l'approche énergétique

Nous avons constaté, avant enseignement une notion floue très répandue, déjà observée par d'autres chercheurs, mélange de courant, d'énergie et d'intensité. Les interprétations énergétiques cherchaient à rendre compte, par une modification de l'intensité, des échanges énergétiques au sein du circuit. De l'enseignement d'un système avec transfert d'énergie, illustré par une analogie mécanique à laquelle on a très souvent recours, on peut espérer remplacer cette représentation par celle décrite par R. Millar :

« l'énergie est transférée à partir de la source dans une direction et consommée. Au contraire, le courant qui permet le transfert de cette énergie est conservé. »

Ainsi, traiter l'aspect énergétique devrait faire évoluer les interprétations rencontrées en réponse à la question :

« Pourquoi deux ampoules en série éclairent-elles pareil et moins qu'une seule ? »

« elles se partagent l'énergie, le courant fourni par la pile » ou

« la première a grillé la moitié des électrons. »

et on devrait assister à une **diminution** significative du **taux d'interprétations énergétiques**, par exemple de prévisions où il existe une variation de l'intensité de part et d'autre d'un dipôle qui serait due à une consommation de « courant » par ce dipôle (**raisonnement séquentiel**), parce que le problème de l'énergie serait réglé de manière qualitative.

L'implicite de l'enseignement habituel rend la connaissance nouvelle adaptable aux représentations : parler de l'énergie devrait éviter que cette part d'implicite permette une réception des informations sans en mesurer la nouveauté.

On pourra **rechercher les effets de cette hypothèse** en observant l'évolution :

- du taux d'interprétations énergétiques dans les réponses ;
- de la fréquence du raisonnement local et séquentiel après cette approche, puisque l'intensité ne devrait plus rendre compte de la consommation d'énergie au sein du circuit. Peut-être l'évolution se fera-t-elle vers le raisonnement à courant constant, hypothèse à vérifier : ce serait déjà un réel progrès...

1 - c – Effets en lien avec l'approche qualitative

Le but de cette approche serait la formation de représentations mentales et la construction de modèles explicatifs et prédictifs, ce que l'enseignement usuel ne permettrait pas, nous semble-t-il. Nous cherchons à démystifier et à donner du sens. Aussi les effets attendus sont :

- une prise de sens de chaque concept par formation d'une représentation et par acquisition de propriétés ;
- un progrès au niveau des réponses aux questions qualitatives par l'amélioration de la compréhension du fonctionnement d'un circuit électrique.

On peut tenter de tester cette hypothèse par l'**observation de la nature des explications** fournies par l'élève pour justifier ses prévisions. On peut chercher à repérer si la justification est qualitative ou mathématique, précise ou floue voire même absente et parfois préciser :

- s'il utilise une loi récitée par cœur, une formule ou une représentation du phénomène... et si la propriété utilisée est spécifique de ce concept ;
- quels raisonnements conduisent l'élève aux prévisions les plus proches de celles du physicien ? La question sous jacente étant : l'approche qualitative est-elle une aide vers le raisonnement du physicien ?

1 - d – Effets en lien avec l'introduction indépendante et progressive des concepts

Nous avons fait ce choix pour tenter de donner à chacun des concepts un contenu, un sens, une utilité. Aussi chacun est-il introduit en réponse à une question, puis, sur de nouveaux circuits, nous avons essayé de l'enrichir de propriétés en choisissant des situations où il était seul à permettre une explication ou une prévision de ce qui était observé. La mise en relation des concepts, si belle dans sa simplicité, n'étant là que pour illustrer que l'équilibre du système dépend de tous ses éléments.

En général l'élève arrive en 2° avec une **notion floue d'un courant énergétique** : ses explications utilisent souvent un vocabulaire peu spécifique, parfois une loi ou une formule, récitée par cœur, plus ou moins bien exploitée. On pourrait espérer observer d'une part une différenciation de la notion initiale unique en concepts distincts, et d'autre part l'emploi d'un vocabulaire plus différencié.

Pour tester cette hypothèse, qui cherche à faire évoluer les représentations par un début de construction des concepts, peut-être peut-on repérer :

- s'il apparaît une **évolution du vocabulaire** vers des termes mieux appropriés : l'abandon des termes de courant ou d'électricité au profit des concepts, mais aussi, par exemple, pour la différence de potentiel : existe-t-elle entre deux points ou circule-t-elle ?
- la **nature des explications** fournies, sont-elles :
 - qualitatives ou imagées, un début de représentation du concept ;
 - des lois ou des formules, signes que l'élève se raccroche à un formalisme mathématique ;
 - ou restées vagues, non justificatives, proches du stade initial ?
- **des propriétés correctes et spécifiques** pour tel ou tel concept et l'utilisation à bon escient du concept lors d'une demande de prévision ou d'explication.

Dans cette analyse, nous avons tenté de prédire ce que l'on attend plus particulièrement de la mise en oeuvre de chacune des hypothèses. Mais nombre d'effets cognitifs peuvent avoir pour origine plusieurs hypothèses.

2 – Effet global de cet ensemble d'hypothèses sur l'apprentissage

Le but de ces hypothèses est un progrès cognitif. Si celui-ci est observé, pouvons-nous l'attribuer à l'une plutôt qu'à l'autre ? De plus nous avons montré que certains choix se trouvaient reliés : l'approche qualitative conduit à s'appuyer sur des analogies dont le choix est en rapport avec l'existence d'échanges et de transfert d'énergie au sein du circuit. Il devient donc impossible, au vu de ces interactions d'attribuer l'origine d'un progrès cognitif à une seule hypothèse. Il serait le fruit d'un cocktail d'actions.

Cette séquence s'appuie sur un ensemble d'hypothèses qui, quant à leurs effets ne sont pas indépendantes. Aussi chercherons-nous moins à isoler l'effet d'une hypothèse qu'à mettre en évidence **les effets cognitifs observés** et considérés comme **produits** par notre « **bouquet d'hypothèses** ».

Nous pourrions toutefois voir se manifester des effets spécifiques, comme par exemple le fruit d'un travail qualitatif au niveau de la nature des justifications employées.

C - Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

J.L.Closset(1993) a montré qu'il existait au moins quatre modes de raisonnement chez les élèves à propos des circuits électriques qui peuvent être hiérarchisés a priori.

I – Observations d'un chemin cognitif

1 – Quelques observations

J.L.Closset (1989) résume l'évolution du système explicatif utilisé par l'élève à partir de son plus jeune âge :

« Dès le départ la causalité est linéaire et le restera pratiquement jusqu'en fin d'enseignement universitaire pour une majorité d'enfants. Le raisonnement évoluera... ainsi d'un modèle unipolaire, il passera à un modèle des courants antagonistes... Il acceptera sans trop de difficulté un modèle circulaire dès l'instant où l'usure du courant lui permet de rendre compte de l'alimentation de l'ampoule en énergie... ce qui le conduira à raisonner séquentiellement... puis une ultime adaptation sous la forme du raisonnement en courant constant... »

Cette description est aussi celle de J.J.Dupin & S.Johsua (1986) qui concluent :

« Toutes les représentations ne sont pas équivalentes d'un point de vue cognitif. Il y a au contraire une progression cognitive entre celles-ci, la représentation à débit constant apparaissant comme une limite difficilement franchissable par les non spécialistes. »

J.L.Closset, en observant les réponses d'élèves à des stades d'apprentissage différents, a noté un déplacement progressif des raisonnements, une diminution du nombre des élèves dont le raisonnement est local ainsi qu'une élévation du nombre de ceux qui raisonnent en courant constant, ce « *qui n'impose pas la prise en compte du circuit en tant que système où tous les éléments interagissent l'un avec l'autre* ». De cette évolution, en lien avec un progrès cognitif, il définit a priori un **chemin cognitif** et en vient (1995) à établir une **hiérarchie cognitive** :

« les raisonnements local et séquentiel apparaissent comme plus primitifs que le raisonnement à débit constant. Ce dernier semble plus simple que le raisonnement systémique correct. »

2 – Quelques justifications a posteriori

Cette hiérarchie observée peut se justifier :

2 - a – Justification à partir du nombre d'éléments de circuit pris en compte

En effet :

- le raisonnement local ne considère que la résistance ;
- le raisonnement séquentiel la résistance et le circuit en aval ;
- le raisonnement à courant constant, l'ensemble du circuit extérieur à la pile ;
- le raisonnement systémique, l'ensemble du circuit.

Cet **élargissement progressif du regard**, nous avons eu l'occasion de le retrouver (M.F.Missonnier, 1996) au niveau d'un circuit possédant une dérivation avec la résistance de l'une des branches variable. Nous avons observé que :

- tout d'abord l'élève ne considère que la branche où la valeur de R varie et selon son stade de représentation, il y raisonne comme sur le circuit simple, toutes choses restant identiques par ailleurs ;
- il vient ensuite à un raisonnement correct dans la branche, toutes choses inchangées par ailleurs, ce qui représente une forme de raisonnement local étendu à la branche dérivée, par rapport à l'ensemble du circuit ;
- puis l'évolution de la résistance peut se faire sentir dans et en aval de la dérivation seulement (raisonnement séquentiel à l'échelle du circuit)
- ou dans les deux branches dérivées, question de maintenir le débit du générateur constant, et donc un courant constant dans le circuit principal.

2 - b – Justification à partir des discontinuités du débit

Dans tous les cas, circuit série ou avec dérivation, on peut également suivre l'évolution à partir des discontinuités du débit :

- le raisonnement local en introduit une de chaque côté de la résistance ou du nœud, soit deux en tout ;
- le raisonnement séquentiel n'en présente plus qu'une seule ;
- le raisonnement à courant constant, aucune.

L'observation des prévisions concernant des circuits avec dérivation est l'occasion de révéler des stades intermédiaires qui confirment le chemin cognitif en en précisant des étapes, cohérentes avec les explications trouvées sur le circuit simple.

II - Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

Cette hypothèse de l'existence d'une hiérarchie des raisonnements qui partirait du plus primitif, le raisonnement local, qui serait délaissé au profit peut-être du raisonnement séquentiel, ou du raisonnement à courant constant avant le raisonnement correct, correspond à une évolution qui serait en lien avec un progrès cognitif. Elle définit a priori un **chemin cognitif qui pourrait être un chemin d'apprentissage** : (J.L.Closset, 1995) émet l'hypothèse que ces raisonnements pourraient constituer :

« des étapes inévitables dans l'étude des circuits...

être une voie de moindre entropie dans la construction de la connaissance »,
représenter « un chemin d'apprentissage ».

Cette hypothèse signifierait que chaque élève passe successivement par les étapes définies ci-dessus : c'est une hypothèse que nous avons eu envie de tester, d'autant plus que nous partions d'une base tellement hétérogène qu'il s'y trouvait non seulement les quatre principaux raisonnements cités, mais aussi des raisonnements plus primitifs, non circulatoires. Nous voulions savoir si effectivement ces différents raisonnements se trouvent utilisés successivement par un même élève, si l'élève les emprunte tous, si ceux-ci se trouvent classés dans le bon ordre... Ces observations d'élèves en cours d'apprentissage montreront peut-être des étapes plus ou moins résistantes et ce qui aide l'élève à les délaisser, étapes qui constitueraient un **chemin d'apprentissage**.

III – Observations à mettre en oeuvre autour de cette hypothèse

La mise à l'épreuve de l'existence de chemins d'apprentissage liés à la hiérarchie cognitive des raisonnements observée par J.L.Closset, nécessite de ne plus globaliser les observations au niveau de classes entières car **ce n'est pas la classe qui apprend, mais chaque élève** : nous allons suivre, élève par élève, l'évolution du raisonnement utilisé pour répondre aux questions, au fur et à mesure de l'avancement de la séquence, et de la complexification du circuit. Après un premier enseignement sur le circuit et la circulation, un test permet de vérifier si cette base de la construction du concept de circulation était bien en place et parfois d'observer le raisonnement utilisé au niveau de l'intensité... Nous disposons pour chaque élève, et pour chaque étape d'apprentissage, de ses prévisions avec ses justifications permettant de le suivre tout au long de la séquence, et même plus tard, en fin d'année ou l'année suivante...

Résumé des analyses

I – Analyses préalables

A – Effets de l'enseignement habituel

Les textes officiels considèrent l'apprentissage de l'électricité de seconde comme un approfondissement des concepts de tension et d'intensité. Les outils proposés pour la conceptualisation ou l'élaboration d'un modèle se résument à la **mesure** et l'**observation**. Ils sont compatibles avec une transmission **inductiviste** d'un savoir qui confondrait modèle et réalité, où la science ne serait pas questionnable.

L'**enseignant** impose des grandeurs physiques, met en évidence des lois, vite mises en application au cours de résolution de problèmes prototypiques en vue de l'évaluation.

L'**élève** suit un protocole expérimental, pour vérifier une loi par des observations et des mesures. Peut-il donner du sens à la grandeur mesurée ? Construire le concept ? Pour lui, le cours se résume à des formules qu'il devrait savoir mettre en œuvre pour résoudre des problèmes. Il tente d'y arriver par imitation : il apprend des solutions, le traitement d'expressions symboliques vides de sens.

Cet enseignement d'une science dépourvue de modélisation, réduite à des **formules** et des **recettes**, **n'intéresse pas l'élève**. De plus, il **lui permet de conserver ses représentations**, faute d'y faire référence.

Nous pensons pouvoir nous appuyer sur une habileté expérimentale des élèves, mais nous émettons des réserves sur l'existence d'une base des concepts, ce que nous allons préciser.

B – Représentations des élèves en électrocinétique, à l'entrée en seconde

Les élèves répondent à des questions portant sur le circuit électrique essentiellement à l'aide du mot « **courant** ». Ils attribuent à cette notion diverses propriétés et un même élève peut en changer selon la question posée : le courant peut être **statique** ou avoir les propriétés d'un **fluide énergétique**. L'élève ignore le concept de d.d.p., est dépourvu de représentation de la résistance. Les représentations les plus fréquentes se manifestent en réponse à des questions portant sur l'intensité du courant : l'élève répond en empruntant un **raisonnement local** ou le plus souvent **séquentiel**. Des entretiens ont montré la diversité des prévisions qui en découlent. Les connaissances actuelles sur les représentations, leur efficacité dans la vie de tous les jours, leur rôle dans l'acte d'apprendre, conduisent à penser que tout apprentissage ne peut les ignorer, doit tenter de « faire avec pour aller contre ».

C – Analyse épistémologique des contenus à enseigner

Elle conduit à considérer la connaissance scientifique comme une construction de l'homme pour tenter de comprendre le monde qui l'entoure. Les scientifiques ont éprouvé le besoin de **concepts**, qui, reliés entre eux, conduisent à l'élaboration de **modèles**, explicatifs et prédictifs.

Le maître, **tuteur** aura à conduire l'élève à se poser des questions, et peu à peu au besoin des concepts du physicien ; **médiateur**, il aura à aider l'élève à négocier des changements cognitifs. Pour faciliter l'accès des concepts à l'élève, le maître devra opérer une **transposition didactique**, transmettre un modèle simplifié que l'élève enrichira progressivement, tout en le rapprochant de celui du physicien. Il peut s'aider d'**expériences** pour **tester les représentations** et faire naître des questions (ainsi les **erreurs** deviennent un tremplin vers la connaissance), d'**analogies** ou d'images pour aider l'élève à se représenter le phénomène, ainsi que d'autres propositions de chercheurs.

D – Contraintes

Si l'enseignement doit prendre en compte les caractéristiques cognitives et le vécu des élèves, l'enseignant dispose d'une liberté pédagogique que nous avons exploitée, tout en respectant l'horaire hebdomadaire, les effectifs d'une classe et les objectifs du programme. Ceci nous a permis d'imaginer et d'expérimenter une séquence basée sur un contrat didactique attribuant un rôle différent tant aux acteurs (maître ou élève) qu'aux activités (T.P., exercices, évaluations) participant à l'apprentissage.

II – Analyse a priori

A – Connaissances sur les processus d'apprentissage en physique

L'hypothèse constructiviste place l'élève au centre du processus d'apprentissage qui se ferait en interaction avec l'environnement. Les représentations des élèves seraient à solliciter par des observations qualitatives jugées paradoxales, qui conduiraient l'élève à s'interroger : c'est la **dévolution** du problème. Si le maître a effectué un choix judicieux d'une situation-problème, celle-ci serait à l'origine d'**interactions** :

- avec le **phénoménal**, où l'expérience peut être utilisée en test d'hypothèses, cherchant à résoudre une situation énigmatique ;
- avec le **maître**, qui a le choix des étapes par lesquelles passera l'apprentissage, des informations et des aides à apporter ;
- **entre pairs** : les réponses et explications des autres peuvent **déstabiliser l'élève et faire naître un conflit cognitif**.

La **pédagogie de la maîtrise** souligne l'importance d'assurer la **maîtrise des pré-requis** avant tout nouvel apprentissage.

B – Nos choix concernant l'apprentissage, sur lesquels se fonde la séquence et conséquences sur son déroulement

Nous voulons **rendre l'élève actif** dans la construction de ses connaissances, **l'initier à une démarche scientifique**, lui montrer que le **monde** qui l'entoure peut être **intelligible**. Notre but est de l'amener progressivement au besoin et à la construction des concepts et des lois du physicien, qu'elles aient du **sens** pour lui. Pour rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances il paraît nécessaire :

- de **partir de l'état réel de ses connaissances**, que nous avons cherché à préciser lors des essais préliminaires : hétérogénéité des représentations, absence de modèle de circuit et de circulation, un courant parfois statique, souvent énergétique ;
- **d'éveiller sa curiosité** par des situations problèmes, mais aussi en ne fournissant des éléments de connaissance qu'en réponse à une question, ce qui conduit l'élève à une modélisation progressive par une initiation à une **démarche de test d'hypothèses**.

Les analyses qui précèdent et le but poursuivi par notre enseignement sont à l'origine des choix qui ont piloté la conception de la séquence :

H₁ – La maîtrise des pré-requis

Comme le suggère la pédagogie de la maîtrise, nous pensons qu'il est judicieux de vérifier l'existence des pré-requis utiles au nouvel apprentissage envisagé. Ainsi, avant d'aborder le concept d'intensité, il nous est apparu nécessaire que les élèves possèdent une représentation du circuit et de la circulation. Cette base commune n'existant pas, elle a fait l'objet du premier apprentissage.

Tout au long de l'apprentissage d'un concept nous fournissons de nombreuses occasions de comprendre (réinvestissements, entretiens dans la mesure du possible, tests sont autant d'opportunités de remédiation) avant de passer à l'étape suivante afin d'assurer une nouvelle base commune pour un maximum d'élèves.

H₂ – Approche énergétique du circuit

Les élèves abordant souvent l'électricité avec la notion d'un courant stockable et consommable, leur analyse se ferait en terme d'énergie. Nous pensons qu'il pourrait être intéressant pour l'élève que l'enseignement fournisse une réponse à sa question implicite. Aussi la séquence aborde le circuit comme étant un système où s'effectuent des échanges énergétiques. Ce choix est étroitement lié à celui du système analogique au circuit électrique : la chaîne de vélo, système mécanique assurant également un transfert d'énergie.

H₃ – Approche qualitative du fonctionnement du circuit

Pour aider à donner du sens, à construire pas à pas, par approches successives les concepts, et peu à peu un modèle de fonctionnement du circuit nous avons fait le choix d'un travail qualitatif qui permette à l'élève de dire comment ça marche. Ce choix se traduit par :

- des questions, des observations, des interprétations qualitatives ;
- le choix des aides, analogies ou images, supports concrets pour la pensée ;
- le nom de conducteur-résistant attribué au composant R, frein à la circulation en série, chemin supplémentaire en dérivation ;
- le choix de travailler avec des circuits qui se transforment, où l'on demande de comparer le fonctionnement du nouveau circuit à celui de l'ancien.

H₄ – Une approche progressive et indépendante des concepts

Cette hypothèse répond au souci d'avancer à petits pas, en réponse à une question de l'élève, pour mieux donner sens à chacun des concepts. Elle pilote le plan de la séquence :

- 1 – La différence de potentiel ;
- 2 – L'intensité ;
- 3 – Le conducteur résistant ;
- 4 – Le circuit, système en interaction ;
- 5 – Conclusion : la loi d'Ohm

C – Effets attendus de ces choix

Nous pouvons penser que certains choix seront à l'origine d'une évolution des réponses et donc des représentations des élèves.

1 - De la maîtrise des pré-requis nous attendons :

- la construction d'un modèle de circuit et de circulation, et donc une diminution du taux de réponses prévoyant l'existence d'une circulation en circuit ouvert ;
- une meilleure implication des élèves dans la tâche d'apprentissage et donc moins d'élèves dépourvus de réponse (de représentation).

2 – L'approche énergétique devrait entraîner une diminution du taux d'interprétations énergétiques, et donc de raisonnement séquentiel.

3 – L'approche qualitative devrait conduire à une meilleure représentation des concepts qui pourrait s'observer à la nature des explications fournies.

4 – L'introduction indépendante et progressive des concepts devrait aider à la disparition de la notion floue de courant au profit de concepts distincts aux propriétés spécifiques.

Nous remarquons que tous ces choix devraient concourir à un progrès cognitif qui, s'il est observé, sera à considérer comme étant le fruit de notre « bouquet d'hypothèses ».

D – Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

J.L.Closset, à partir de réponses d'élèves à des stades d'apprentissage différents a émis l'hypothèse que la hiérarchie cognitive observée pourrait correspondre à un chemin d'apprentissage.

Nous avons profité de l'expérimentation de la séquence pour tester cette hypothèse en observant les raisonnements, mis en œuvre par un même élève en réponse aux questions posées, en fonction de l'avancement de la séquence et de la complexification du circuit.

Deuxième partie

EXPERIMENTATION

A – Méthodologie

Historique de l'expérimentation :

Le texte final de la séquence est le résultat d'une recherche échelonnée sur plusieurs années :

1995-1996 recherche des représentations des élèves par des questionnaires et des entretiens, test des analogies, recherche d'un autre rôle pour les travaux pratiques à partir de T.P. Top, recherche d'un autre contrat didactique. Cette recherche expérimentale avec les élèves en classe est apparue complémentaire d'analyses théoriques préalables et a permis la sélection d'hypothèses sur lesquelles reposerait la première ébauche de la séquence : elle s'appuyait sur les représentations, un travail qualitatif illustré d'analogies.

1996- 1997 la séquence a été expérimentée avec les deux classes du chercheur. Ce premier essai a révélé :

- un engagement des élèves dans l'apprentissage en classe,
- de réels progrès de leurs représentations du circuit, de la circulation et de l'intensité ;
- un début de différenciation entre les concepts I, U et l'énergie. Nous avons cherché à l'améliorer en procédant à un remaniement de l'ordre d'introduction des concepts.

1997-1998 rédaction d'une nouvelle version de la séquence avec ses hypothèses actuelles. Elle a été expérimentée par le chercheur avec deux classes. Cet essai a permis une première validation et nous a conduit à une rédaction définitive plus précise en vue d'une expérimentation par d'autres enseignants.

Nous ne développerons pas, dans le cadre de cette thèse toutes les étapes. Nous ne parlerons que de la version définitive, c'est à dire des recueils et analyses de données des années :

- 1998-99 avec l'expérimentation par un stagiaire et un collègue de Brive, en plus du chercheur ;
- 1999-00 avec l'expérimentation dans d'autres académies en plus du chercheur.

I - Les acteurs de l'expérimentation

Les séquences d'enseignement décrites dans la littérature mettent en jeu, le plus souvent, le chercheur lui-même, une classe ou une poignée d'élèves volontaires. Lors de l'analyse du champ de contraintes, nous avons précisé que nous avons fait le choix d'expérimenter la séquence en situation de classe. Concrètement, cela veut dire un enseignant avec sa classe aux heures officiellement prévues dans leur emploi du temps. Nous allons expliciter les différentes situations rencontrées. Nous aurons besoin de les avoir présentes à l'esprit lors des observations et de leur analyse.

1 – Les enseignants

a – Le chercheur

Dans les séquences d'enseignement décrites jusqu'ici, l'enseignant et le chercheur sont une seule et même personne. Dès le début, nous voulions expérimenter cette séquence avec des enseignants ayant pour profession d'enseigner... afin de dissocier celui qui enseigne du chercheur qui analyse ce qui se vit au cours de cet enseignement. Ceci nécessitait de disposer d'une démarche rigoureuse, transmissible au minimum par un texte écrit suffisamment précis.

Lors des essais préliminaires le chercheur a travaillé seul ce qui lui a permis de compléter ses analyses préalables par des questionnaires et des entretiens. Il disposait alors d'une représentation des outils avec lesquels l'élève aborde le cours d'électricité de seconde lui permettant d'imaginer les questions susceptibles de faire naître un débat, d'être à l'origine d'une situation problème, d'entraîner l'élève dans une démarche de test d'hypothèses. Puis il a testé :

- **un autre contrat didactique** avec lequel il s'est peu à peu familiarisé. L'enseignant n'est plus une source intarissable de savoir. Il doit réserver une place primordiale à l'activité de l'élève, favoriser :

- d'abord son questionnement face à une situation qui le surprend, ou une situation à l'origine d'un conflit cognitif, soit avec lui-même, soit avec des pairs ;
- puis la recherche d'une réponse (une situation où l'élève manquerait de données pour répondre, tels les circuits partiellement cachés de S.Fauconnet (1981), a révélé une rupture de contrat didactique trop forte, situation rejetée par les élèves et nous n'avons pas récidivé...)
- **une autre démarche expérimentale** à partir de quelques T.P.Top. Les réactions des élèves devenaient positives après deux ou trois séances : *« nous comprenons ce que nous faisons : c'est nous qui décidons de l'expérience à faire, nous savons pourquoi nous la faisons, nous en attendons quelque chose »*, mais *« c'est dur, c'est du travail ! »* comparé à leur rôle habituellement passif au cours des séances de T.P..
- **les analogies** : nous pensions que le maître pouvait en proposer à l'élève pour l'aider à se représenter les concepts, mais nous tenions à observer dans quelle mesure l'élève pouvait se les approprier et les utiliser : pouvaient-elles effectivement constituer une aide pour se représenter le fonctionnement du circuit ?

Les observations préliminaires des réactions des élèves ont, par aménagements successifs, permis la rédaction de plus en plus détaillée du texte de la séquence. Celle-ci devenait alors transmissible à d'autres enseignants, et, pour commencer, au sein du même établissement, au lycée d'Arsonval à Brive.

b - Les enseignants de Brive ayant participé à l'expérimentation (1998-99)

Un stagiaire : cette année là, l'IUFM de Limoges m'avait confié un stagiaire ouvert à une démarche pédagogique différente de celle avec laquelle il avait appris (souvent, ils cherchent plutôt à dupliquer l'enseignement reçu).

Nous nous rencontrons une fois par semaine pour mettre au point la démarche, ce qui m'a permis d'en mesurer le caractère inhabituel que j'aurais eu tendance à sous estimer, tant il me devenait familier. Voici par exemple le dialogue entre le stagiaire S et le chercheur C lors d'une première rencontre :

- S « Je commence par leur distribuer le questionnaire ? »
- C « Oui, puis tu les relèves et chez toi, tu lis leurs réponses pour prendre connaissance des différentes représentations, explications de tes élèves... Le mieux serait même de noter les plus étonnantes, pour être sûr qu'elles se trouvent exprimées en classe... »
- S « Et au cours suivant je leur donne la réponse ? »
- C « Non ! Surtout pas ! Tu remets à chacun son questionnaire, tu les invites à se grouper par 3 ou 4 et à mettre en commun leurs réponses à la première question. Tu passes dans les rangs pour observer leurs réactions... »
- S « Puis je fournis la réponse ? »
- C « Non ! Toujours pas... Tu demandes à un élève de chaque groupe d'exprimer ce qui vient de se dire (on est en T.P., ce qui représente de 4 à 5 groupes) et tu notes au tableau la question et chacune des représentations afin que toute la classe puisse bien en prendre connaissance. Tu vérifies que toutes les représentations que tu avais relevées aient bien été exprimées, sinon tu les réclames à leurs auteurs ou tu signales une réponse fournie par un élève d'un autre groupe. Ces réponses différentes à une même question engage un débat au niveau de la classe, qu'il y ait accord ou non sur une réponse. Comme il pourrait y avoir accord sur une réponse fausse, notre rôle est de leur demander :

« Comment savoir ? Comment ferais-tu pour savoir ? »

Souvent ils ont l'idée d'une expérience à mettre en oeuvre, et qu'ils ont alors envie de réaliser de suite... Tu les invites alors à compléter sur leurs feuilles :

- les hypothèses à vérifier par l'expérience, c'est à dire la question qu'ils se posent
- les observations : la lampe éclaire ou n'éclaire pas...
- les conclusions qu'ils tirent de cette expérience : celles-ci seront à mettre en commun en vue de la formulation d'une conclusion acceptable par la classe et partagée par l'enseignant.

Etant donné ces échanges réguliers, ce suivi (il m'est arrivé d'assister à l'un de ses cours), je pense pouvoir dire que ses élèves ont appris en suivant une démarche proche de celle du chercheur.

Un collègue, qui cette année là avait en charge deux classes de seconde, a bien voulu travailler en utilisant la séquence dans une classe tout en poursuivant son enseignement habituel dans l'autre. Je lui ai proposé de le rencontrer quand il voulait pour en parler... mais je n'ai eu aucun retour. Il a seulement confié au stagiaire

son étonnement à la lecture des réponses fournies par les élèves aux questions : il a donc pris conscience des représentations de ses élèves avant enseignement... En fin d'année, ayant constaté des réponses qualitativement différentes de ses deux classes au questionnaire d'évaluation en fin de seconde, je lui ai demandé s'il pouvait me préciser en quoi son enseignement avait pu différer entre ses deux classes. Cela lui paraissait difficile... il avait semble-t-il suivi fidèlement le déroulement du polycopié complété par les « objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence ». mais a-t-il analysé :

- la nouveauté du contrat didactique, du rôle du maître, de celui de l'élève ou de la place de l'expérience ?
- l'importance de maîtriser les prérequis ?
- le fait que la première analyse est qualitative, illustrée par des analogies ?

c – Les enseignants d'autres académies (1999-2000)

Enseigner l'électricité à partir du texte de la séquence et du document d'accompagnement par les collègues sur place n'ayant apparemment pas soulevé de difficulté, il devenait envisageable de délocaliser l'expérimentation afin de sortir de l'étude de cas du lycée d'Arsonval à Brive, avec son projet d'établissement... Aussi nous sommes nous mis en recherche de collègues acceptant de se lancer, avec leurs élèves dans cette aventure.

Je dois signaler qu'à cette date, je pensais pouvoir les rencontrer début septembre (et d'autres fois si besoin) en vue de leur préciser la démarche ou de répondre à leurs questions. Cela n'a pas été envisageable cette année là.

Nous avons accepté toutes les bonnes volontés que le hasard de relations ont fait se proposer, à savoir une collègue de Grenoble, une de Lille et deux stagiaires de Nantes. La plupart des contacts sur Nantes et sur Lille ont été téléphoniques, sur Grenoble écrits.

Voici la première réaction de l'enseignante de **Grenoble** (M.C.G.) à la lecture des documents fournis :

« J'y trouve tout à fait mes préoccupations et mes convictions : nécessité de faire émerger les représentations des élèves, de les faire les confronter à celles de leurs pairs, à l'expérience... pour qu'ils donnent du sens à ce qu'ils apprennent en se l'appropriant et en construisant eux-mêmes leur savoir, ayant d'ailleurs droit à l'erreur dans ce processus. Le prof est un médiateur leur fournissant les occasions de cet apprentissage. Je suis persuadée, également, de l'importance qu'a la verbalisation dans l'apprentissage... Je suis tout à fait intéressée pour être, avec ma classe de seconde, un nouvel expérimentateur... »

Puis préparant son cours, fin Août elle note :

« 1 – Forme : Lu tout. Très intéressée, très en phase... Je découvre l'analogie avec la chaîne de vélo : très bien. Je trouve très fort l'introduction tout au long de l'énergie. J'apprécie que rien n'est laissé au hasard dans les exemples choisis, ils annoncent tous la suite, s'enchaînent... »

2 Fond : Je souhaite que les élèves voient le circuit comme un tout où tout interagit, et pas comme une succession de composants, où le courant aurait une histoire... »

Cette correspondance révèle un accord de préoccupations confirmé par d'autres courriers en cours d'expérimentation de la séquence.

Un même suivi, téléphonique celui-là, a été assuré avec M.B.D. enseignante à Lille.

Quant aux expérimentateurs de **Nantes**, ils sont restés anonymes, en relation avec un enseignant-chercheur en didactique attaché à l'IUFM, mais un peu débordé, semblerait-il... Ils ont au moins travaillé à partir des documents écrits...

d – Liens entre les expérimentateurs et le chercheur

La lecture des différentes étapes de l'expérimentation montre que la transmission de la séquence a pu se trouver involontairement limitée au texte écrit pour :

- R.M. le collègue de Brive et
 - les expérimentateurs de l'académie de Nantes,
- comme être complétée d'informations au coup par coup pour la collègue de Lille (appels téléphoniques réguliers), ou de Grenoble (traces écrites), ou bénéficier d'un suivi attentif : le stagiaire du chercheur.

Nous aurons à nous en souvenir lors de l'évaluation : l'apprentissage vécu par les élèves ayant appris avec la séquence a sans doute pris des modalités différentes.

2 – Les élèves

Les élèves, bien que tous inscrits en seconde, forment une **population disparate** :

- au lycée de Brive, jusqu'à la rentrée 2000, lors de l'inscription en seconde, il leur était demandé leur projet professionnel. Selon le cas ils se trouvaient inscrits :
 - o dans une seconde dite « *scientifique* », si leur projet nécessitait un baccalauréat de la série scientifique,
 - o ou une seconde dite « *indifférenciée* », regroupant à la fois les élèves ayant un projet nécessitant le baccalauréat série « sciences économiques » comme les élèves sans projet,
 - o ou encore une seconde dite « *littéraire* ». si leur projet passait par un baccalauréat de la série littéraire.

La séquence s'est trouvée enseignée à des élèves de sections « scientifiques » ou de sections « indifférenciées » ;

- dans les autres lycées, les secondes sont toutes indifférenciées, ce qui, par là même, ne peut pas avoir la même signification qu'à Brive : toutes les aptitudes, tous les projets peuvent s'y côtoyer.

Cette diversité oblige à ne pas analyser la progression de chaque classe sans tenir compte du recrutement des élèves qui la composent. Par ailleurs l'observation des résultats d'un même apprentissage avec des classes dont les élèves ont été regroupés selon des critères différents peut permettre une réponse à une question d'actualité :

« La seconde indifférenciée permet-elle le maximum de progrès pour chaque élève ? »

Nous connaissons la réponse de Th. Roosevelt qui aurait dit :

« Il est aussi discriminatoire de traiter des problèmes identiques de manière différente que de traiter des problèmes différents de manière identique. »

Quelle sera la notre, suite à l'expérimentation et à son analyse ?

II – Recueil et analyse de données

Lors de l'analyse des contraintes, nous avons signalé que l'enseignant est aussi celui qui recueille les données fournies par ses 34 élèves. Aussi nous ne pouvions pas nous lancer dans des enregistrements, des retranscriptions d'expressions et encore moins de dialogues dont il aurait été le témoin auditif. Pourtant, désireux de suivre l'évolution, pas seulement de la classe, mais de chaque élève personnellement nous avons besoin d'un maximum d'informations à chaque étape de l'apprentissage. C'est pourquoi nous avons opté pour un maximum de traces écrites au niveau des documents de travail des élèves.

1 – Données recueillies

a – Les réponses aux questionnaires

Les questionnaires « papier-crayon »

Nous avons beaucoup fait usage de questionnaires « papier-crayon », dont J.L.Closset (1983, p.32) cite quelques avantages :

- « ils standardisent le questionnement,
- ils permettent de consulter des populations importantes et nombreuses en un temps raisonnable,
- ils constituent une trace permanente ne nécessitant pas de retranscription avant dépouillement,
- ils suppriment quasiment toute espèce d'influence particulière de l'interviewer. »

Ces questionnaires sont constitués, le plus souvent, de questions fermées, exhaustives : le sujet doit choisir parmi les réponses qui lui sont proposées, lesquelles recouvrent tous les cas possibles. Chaque question est assortie d'une demande de justification. Les questions sont construites de telle manière qu'à un ensemble « réponse + justification » correspond en général une seule interprétation en termes de raisonnement du sujet.

Nous avons conscience qu'une même réponse pouvait provenir de représentations différentes, c'est pourquoi, après chaque réponse, il est demandé à l'élève de la **justifier** le plus clairement possible, afin de guider notre analyse en termes de raisonnement. Les élèves ont été avertis qu'ils participaient à une recherche tout en progressant dans leur cours d'électricité. Le questionnaire visant à découvrir leurs difficultés pour tenter d'y remédier, nous avons cherché à les motiver pour répondre avec le maximum de détails :

- puisqu'il n'y a pas de jugement de valeur (un questionnaire n'est pas un test), et
- si l'enseignant ignore leur mode de raisonnement, il ne peut pas en tenir compte. Au contraire, la connaissance de leurs raisonnements permet un enseignement plus personnalisé : un questionnaire est conçu pour constituer une aide à l'élève dans sa compréhension des phénomènes observés et dans la prévision d'autres.

En expliquant le rôle de ces questionnaires aux élèves nous cherchions à leur faire comprendre l'importance de prendre le temps de développer leur façon de penser, non pour qu'elle soit jugée par l'enseignant, mais pour qu'il la connaisse et puisse en tenir compte pour les aider à en mesurer la validité.

Le plus souvent la justification se trouvait être en cohérence avec la réponse qu'elle complétait et confirmait. Dans le cas contraire, nous avons toujours privilégié la justification parce qu'elle traduit un cheminement de la pensée.

Les essais préliminaires avaient révélé une très grande diversité de représentations au sein de la population entrant en seconde. La plupart de ces représentations avaient déjà été décrites par des chercheurs, souvent chez des élèves plus jeunes. Ces essais nous ont permis de poser des questions ciblant une situation dont nous savions qu'elle serait analysée avec des représentations variées, qui aboutiraient à des prévisions différentes, notre but étant de conduire l'élève à se poser des questions, le mettre en recherche. Lors des dernières expérimentations, à chaque question nous pouvions fournir les différentes réponses attendues, nous n'avons pas eu de surprise quant au contenu des réponses.

Comme on connaît ses élèves, on apprend à travailler avec : bien que l'élève sache que ce travail n'est pas noté, qu'il représente surtout une base d'apprentissage, l'élève qui hésite est tenté de se rassurer auprès de son voisin... Aussi, souhaitant pouvoir suivre chaque élève, et non des binômes, nous avons toujours établi deux versions d'un même questionnement : un questionnaire A et un questionnaire B distribués à des voisins. Souvent seul l'ordre des questions et / ou les lettres utilisées et / ou le sens dans lequel était dessiné le schéma variait. Les élèves étaient prévenus que ses questions étaient différentes de celles de son voisin et donc que sa réponse ne pouvait en aucun cas l'aider à compléter son propre questionnaire.

Avant de passer le premier questionnaire en classe de seconde, nous avons vérifié qu'il soit intelligible :

- en posant la question en terme de courant, terme qui appartient à leur vocabulaire ;
- en leur demandant de dessiner le schéma d'une pile, d'une ampoule, d'un interrupteur ouvert et d'un interrupteur fermé. Nous avons mis au tableau tous les tracés trouvés, puis sélectionné et défini le schéma normalisé de ces composants, et surtout
- en cohérence avec le choix d'un enseignement **qualitatif**, les questions posées sont toutes qualitatives, demandent une réponse justifiée à partir des propriétés qualitatives des concepts de l'électricité supposées connues des élèves à ce niveau d'enseignement, mais repérées comme non maîtrisées et objets de l'apprentissage.

Toutefois, pour les questionnaires passés après l'enseignement de l'électricité, soit en fin de seconde, soit en 1^{er}S, à des populations d'élèves ayant appris avec la séquence mais aussi à des populations témoins ayant suivi un enseignement habituel, nous avons tenu à ce que l'une des questions soit source de calculs et de résultats chiffrés. Dans nos analyses, nous avons signalé que l'enseignement privilégiait formules et calculs. Les élèves ne sont pas habitués à fournir une réponse uniquement avec des phrases. On pourrait alors penser que si les réponses de la population témoin diffèrent de celles des élèves de la séquence, c'est en raison de la nature des questions posées. Il nous a donc paru important, en vue de permettre une référence extérieure objective, qu'il y ait une part de questionnement quantitatif auquel les élèves de la population témoin devraient être plus familiers, et qui est celui des évaluations officielles. Ceci permettra aussi de comparer la qualité des réponses fournies aux deux formes de questions : calculent-ils mieux qu'ils ne raisonnent ?

Rôle et place des questionnaires

Les questionnaires participant à l'apprentissage : nous en avons fait usage, pour chacun des concepts, aux trois étapes de l'apprentissage :

- **avant enseignement** : il permet à l'élève d'exprimer ses représentations, de prendre conscience qu'il en existe d'autres et de le mettre en recherche ;
- **lors du réinvestissement** : il permet à l'élève d'évaluer son degré de compréhension, de préciser ses connaissances et éventuellement d'étendre leur domaine de validité ;
- **lors de l'évaluation** : il a les mêmes fonctions que le précédent en fournissant une dernière opportunité à chacun de maîtriser ce qui représente les prérequis nécessaires pour passer à l'étape suivante.

De plus, à chaque étape de l'apprentissage le maître dispose des représentations de chacun, peut tenter des remédiations ou des apports théoriques, mettre en place des discussions ou l'exploitation d'une analogie, proposer une vérification expérimentale...

Les questionnaires servant à une évaluation : des questionnaires ont été élaborés uniquement dans un but d'évaluation interne et / ou de prise de repères externes. Nous avons ainsi passé un questionnaire :

- à l'entrée en seconde,
- en fin de seconde,
- en 1^{er}S en demandant à l'élève de préciser la classe où il était l'an passé, afin de connaître la nature de l'enseignement suivi en électricité.

Nous avons commencé par un questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'électricité en seconde, passé une année à tous les élèves entrant en seconde. Le but était de savoir si la classe qui apprendrait avec la séquence était au départ comparable aux autres. Ce repère initial autorisait ensuite à se poser les questions :

- sera-t-elle toujours comparable en fin d'année ?
- que deviendront, dans un an, les acquis en électricité pour tous ces élèves ?

Le but des deux derniers questionnaires était donc d'évaluer les connaissances en électricité après six mois « d'oubli », puis un an plus tard, et de pouvoir établir une comparaison selon l'enseignement suivi.

b – Les entretiens

Pour faire un pas de plus dans la connaissance des représentations des élèves nous avons réalisé de nombreux entretiens à deux étapes de notre recherche :

Lors des essais préliminaires, nous cherchions à préciser des représentations dont l'interprétation ne nous était pas immédiate, tels :

- le courant circulant en boucle à l'intérieur d'une dérivation (a) ;
- le courant arrivant à un interrupteur ouvert (b) ;
- le viol de la loi des noeuds (c).

Ces représentations étaient pour nous source de questions que nous souhaitions poser à l'élève, par exemple pour les prévisions (a) et (b) : « que devenait le courant après ? », ce qui nous a permis de réaliser pour les représentations :

- de type (a) qu'il s'agissait soit d'un regard local, limité à la boucle, soit d'une forme de raisonnement unipolaire ;
- de type (b), l'élève prévoyait une fuite au niveau de l'interrupteur ouvert : le courant s'échappe, s'évapore... mais le plus souvent, notre question, l'élève ne se l'était jamais posée car, pour lui, il n'y avait pas d'après, le courant étant statique.

Ces entretiens ont souvent permis une médiation : en donnant au maître l'occasion de mieux réaliser ce que représentait le courant pour l'élève : *« il y en a là... il est présent... il ne circule pas »* il lui permettait une intervention fructueuse en lui expliquant le caractère antinomique de telles affirmations au regard de la définition du courant électrique du physicien.

Lors des prises de repères externes, dans les questionnaires passés à des populations ayant suivi un enseignement habituel nous avons des proportions importantes d'élèves n'ayant pas fourni de réponses, plus particulièrement aux dernières questions. N'ayant pas fait passer nous-mêmes le questionnaire, nous cherchions à savoir si c'était faute de temps ou par absence de connaissance. Nous avons rencontré tous les élèves de 1^{er}S que nous avons pu identifier (le questionnaire étant normalement anonyme...), soit une vingtaine d'élèves. Ils étaient effectivement dépourvus de réponse, mais aussi de représentation, et là encore ce fut l'occasion d'un début de remédiation : ils repartaient heureux de commencer à comprendre et les élèves suivants se rendaient volontiers à l'entretien...

Entretiens et remédiation : les entretiens auraient également pu constituer une forme de remédiation intéressante, dans le cadre de notre hypothèse de la maîtrise des prérequis : l'élève est invité à exposer ce qu'il pense, à en développer les différents aspects et à en imaginer les conséquences... ce qui, parfois :

- le place face à ses propres contradictions,
- ou révèle une confusion dans le vocabulaire : l'élève utilise les mêmes mots tel le courant pour exprimer quelque chose de différent du physicien. Nous avons évoqué le « courant statique », ou « intensité = vitesse » ce qui justifiait le viol de la loi des noeuds.

Il suffit alors de peu de chose pour que l'élève construise une nouvelle représentation plus cohérente, donc plus satisfaisante pour lui, que son regard s'éclaire... et que son intérêt pour la physique renaisse. Le chercheur n'a pas pu le faire faute de moments de liberté en commun avec ses élèves

c – Les réactions des partenaires de la séquence

Nous avons recueilli les réactions des élèves après le premier essai et des enseignants, parfois en cours de séquence et toujours en fin d'expérimentation.

Les élèves : après le premier essai, nous avons fait passer un questionnaire aux élèves (texte et réponses recueillies, Annexe VIII). Leur évaluation, essentiellement positive, nous a encouragé à poursuivre en intensifiant le travail sur le concept de différence de potentiel. Pour notre part, nous avons observé un comportement de classe nouveau, où l'élève est actif et intéressé : il attend, puis recherche la réponse à sa question. Aussi lorsque l'expérience vient à contredire sa prévision, après avoir vérifié son montage, il est en quête d'explication, ce que confirme les réactions des autres expérimentateurs :

Le stagiaire : en fin d'année il en venait à se demander comment on pouvait continuer à enseigner sans tenir compte des représentations des élèves. Dans son mémoire professionnel, il a cherché à établir une comparaison entre certains acquis des élèves ayant appris avec la séquence et les autres, par exemple il cherchait à savoir ce que devenait la représentation d'une circulation en circuit ouvert. Dans ce but il a fait passer un questionnaire dans de nombreuses classes de seconde. Voici un élément de sa conclusion (L. Jourdes, 1999 ; p. 23 – Annexe VII) :

« Il semblerait que l'enseignement « didactique » par un travail plus qualitatif sur des circuits évolutifs, entraîne l'élève à réfléchir et à mieux se représenter le fonctionnement du circuit. L'inconvénient est qu'il est long, mais ne vaudrait-il pas mieux que l'élève de seconde possède des bases correctes en électricité, qu'il retrouvera tout au long de son cursus scolaire, et même dans la vie courante ? »

Les expérimentateurs des autres académies

M.C.G. de l'académie de Grenoble (2 – XI – 99) décrit les lenteurs de mise en place du nouveau contrat didactique :

« Questionnaire avant enseignement : ils le font sérieusement... Une fois les prévisions faites, ils disent :

« c'est juste ? »

La réponse du prof leur suffirait.

La phase de mise en commun par petits groupes est difficile... car leur préoccupation est plutôt :

« est-ce que j'ai juste ? »

alors, quand ils voient ce qu'a écrit le voisin, ils ont plutôt tendance à corriger leur réponse divergente plutôt que réfléchir ou solliciter l'expérience. Même en classe entière, ils veulent savoir si c'est juste ou si c'est faux.

J'ai senti jusqu'à présent tout le bénéfice des questions avant enseignement... même s'ils font tous la même chose, du fait du questionnement préalable, de la mise en commun des conceptions et / ou des questions des uns ou des autres, fait que leur même manip prend tout le temps le cadre d'une question personnelle, et on sent « qu'ils sont dedans ». Le verdict du résultat est attendu vraiment en tant que tel. Leur questionnement semble remettre en question, pour ceux qui en avaient, jusqu'à leurs connaissances antérieures :

« C'est ce qu'on a appris l'an passé, me semble-t-il... » mais on doute...

Moi, prof, je me rends compte du fossé qu'il y a entre ce que les élèves savent parce qu'ils l'ont appris (et bien appris, su et mémorisé), ou parce qu'ils l'ont compris. Je me rends compte que ceux qui savent, savent des savoirs-faire. Ils n'ont pas encore accédé au concept (c'est peut-être d'ailleurs normal, mais ce qui anormal c'est que l'esprit du programme ne s'en donnait pas les moyens...).

Le 12 – I – 2000 elle m'informe des réticences des collègues pour servir de référence extérieure à la séquence :

« Bien sûr, tu as pris plus de temps que nous, alors, sa méthode est peut-être bonne mais la nôtre, la tienne habituelle marcherait peut-être aussi bien en prenant plus de temps »... Je me demande s'ils n'ont pas craint une comparaison dans le sens « performances du prof et non des élèves » pourtant on s'entend tous bien et reconnaissons tous les défauts de la méthode actuelle ! »

Après l'expérimentation de la séquence, voici ses réactions et celles des élèves au 29 – VI – 2000 :

- « Je l'ai très bien appréhendée, les élèves aussi, je crois.
- Ce que je regrette un peu et les élèves l'ont fait sentir à la fin aussi, c'est un peu de lassitude, car c'est « toujours pareil »...

M.B.D. de l'académie de Lille : « Si je fais le bilan de cette expérience, je peux dire que malgré la contrainte que représentait la méthode, elle m'a permis de faire « passer le courant » de façon plus tangible, plus pratique qu'avec l'enseignement classique, et les formules à appliquer. Le modèle de la chaîne du pédalier est judicieux pour la compréhension générale.

Quant aux élèves, les élèves intéressés, ils m'ont dit que l'électricité n'est pas facile à comprendre, mais que les modèles leur avaient permis de mieux se représenter les phénomènes... Il faut noter que cette méthode demande aux élèves un effort de représentation qui nécessite plus d'engagement intellectuel que la simple application d'une formule (ce qui est toujours plus rassurant pour l'élève ! »

G.L.M. responsable des expérimentateurs sur Nantes écrivait le 10 – VIII – 2000 : « Il m'a été pratiquement impossible d'avoir des commentaires de la part des collègues qui ont semblé perturbés par la méthode. Un point positif malgré tout qui revient assez souvent c'est la prévision des mesures demandée aux élèves avant l'expérience. Il semblerait que cette technique ait permis aux collègues de mieux isoler les problèmes liés à l'apprentissage de l'électrocinétique. En revanche ce qui perturbe énormément l'enseignant, c'est une impression de redite. Non seulement il insiste beaucoup sur des points jusque là, il faut bien l'avouer supposés acquis (par exemple la circulation), mais il doit de surcroît faire sans cesse des allers-retours. Or ceci ne correspond pas encore à la conception de l'enseignement en lycée où l'important c'est de finir le programme et donc de faire « avaler » les leçons les unes après les autres sans se retourner ! »

2 – Analyses prévues en lien avec les hypothèses

a – La recherche de chemins d'apprentissage

Pour tenter d'observer un chemin d'apprentissage il faut disposer d'un maximum de traces écrites fournissant des étapes par lesquelles passe l'élève au cours de son apprentissage, tandis que le niveau des questions s'élève peu à peu. Dans plusieurs classes, nous avons relevé pour tous les élèves de ces classes, les réponses d'un même élève :

- après l'enseignement de la circulation, ce qui fournit sa représentation avant l'enseignement de l'intensité ;
- lors du questionnaire préliminaire à l'intensité, portant sur le circuit simple ;
- lors du réinvestissement, après un premier enseignement de la définition du concept d'intensité, sur le circuit série ou dérivation, puis le circuit mixte ;
- lors du test sur les différents circuits, le circuit mixte permettant d'observer comment se fait le réinvestissement au niveau de la branche principale ainsi qu'au niveau de la branche dont la valeur de la résistance varie ;
- lors du test final en Mai 2000.

Nous disposons souvent de ces cinq étapes de l'apprentissage du concept d'intensité, ce qui permet de suivre la représentation, pour un élève donné, au niveau :

- du circuit simple, puis du circuit série ;
- de la loi des nœuds ;
- du générateur et de la branche principale et
- de la branche dérivée où R varie.

b – La recherche d'effets attendus en lien avec les hypothèses

Observations en lien avec la maîtrise des prérequis

Nous aurons tout d'abord à observer si la maîtrise a été contrôlée au commencement de la séquence, mais aussi à chaque étape de l'apprentissage :

- **en début d'enseignement**, le questionnaire préliminaire avant l'enseignement de l'électricité en seconde avait pour but de permettre d'adapter l'enseignement au niveau réel de l'élève qui entre en seconde. Nous observerons quel est ce niveau et ce qui a été fait pour le prendre en compte. Le premier concept introduit comme cause de la circulation dans un circuit étant le concept de d.d.p., les concepts de circuit et de circulation apparaissent comme les prérequis indispensables à un début de construction de ce concept. Etaient-ils maîtrisés par tous les élèves ? Lors de nos analyses, nous avons montré que maîtriser les prérequis nous imposait l'enseignement de concepts implicitement considérés comme connus, qui appartiendraient tout naturellement aux représentations des élèves. Nos questionnaires ayant révélé qu'une majorité d'élèves les ignoraient, nous aimerions savoir si, en fin de seconde les élèves ont acquis ces concepts : les élèves pour qui ces concepts ont fait l'objet d'un enseignement, et ceux qui n'en ont pas reçu ont-ils la même représentation du circuit et de la circulation ? L.Jourdes (1999) dans son mémoire professionnel, se posait la question de l'intérêt d'enseigner des notions qui ne figurent habituellement pas dans les programmes.

Cette conséquence directe de la maîtrise des prérequis vient compléter la recherche des effets attendus de la mise en oeuvre de cette hypothèse, à savoir :

- une élévation du niveau de maîtrise des objectifs enseignés, et
- une réduction de la dispersion des représentations.

Il est possible d'imaginer un travail similaire par exemple sur le concept de conducteur résistant, grand absent de l'enseignement et que nous avons jugé nécessaire de construire avec nos élèves, comme prérequis à la loi d'Ohm, au même titre que les concepts d'intensité ou de différence de potentiel.

- **en cours d'enseignement**, comme prérequis au concept d'intensité, nous avons pensé nécessaire d'aborder le fonctionnement du circuit d'un point de vue de l'énergie : où est-elle stockée, où est-elle transformée, comment est-elle transférée du lieu de stockage au lieu de transformation ? Ceci dans le but d'aider l'élève à distinguer le courant constitué de charges mobiles qui se conservent, de l'énergie qui se consomme, alors qu'il les réunit dans une notion unique de « fluide énergétique » qui s'use au fur et à mesure qu'il sert à faire briller les lampes, ou ... Nous pourrions observer si les interprétations évoluent, en ne cherchant plus à rendre compte des transformations de l'énergie, c'est à dire :

- si les justifications en terme d'énergie disparaissent ou du moins sont en diminution significative ;
- s'il apparaît une déstabilisation du raisonnement séquentiel dont l'un des rôles semblait être de rendre compte des échanges énergétiques.

Nous réalisons ici que la seconde hypothèse est liée à la première, et devraient toutes deux permettre un progrès cognitif.

Observations en lien avec le travail qualitatif

Nous avons fait le choix d'un travail qualitatif pour permettre à l'élève de donner du sens, de construire une représentation des différents concepts. Nous pourrions observer :

- la nature des justifications données par les élèves ayant appris avec la séquence, les comparer à celles avant enseignement, ou à celles d'élèves ayant eu une autre approche des concepts ;
- la nature des justifications qui conduisent aux prévisions les plus proches de celles du physicien, c'est à dire rechercher quel type de démarche mène le plus grand nombre d'élèves à fournir la prévision attendue.

Ce travail qualitatif conduit à faire progressivement évoluer le circuit en ajoutant ou en retirant un composant. Il est demandé à l'élève de prévoir les effets de la modification. Quel est l'intérêt de telles prévisions sur des circuits en perpétuelle évolution est un autre aspect abordé par le mémoire professionnel de L.Jourdes (1999).

Observations liées au « bouquet d'hypothèses » retenu

Nous avons également fait le choix d'une introduction indépendante des concepts afin de donner un contenu à chacun qui lui soit propre. La mise en oeuvre de cette hypothèse devrait permettre à l'élève l'attribution de propriétés correctes et spécifiques à chacun des concepts, c'est à dire contribuer à un progrès cognitif, lequel dépend également des autres hypothèses. Si nous observons un progrès, nous l'attribuerons à ce « bouquet d'hypothèses » qui aurait un effet positif sur l'apprentissage. En fait, on peut s'attendre à ce qu'un enseignement aboutisse à un progrès, aussi la question qui se pose est plutôt l'une de celles-ci :

- Le progrès observé sera-t-il identique ou différent de celui des élèves ayant appris avec l'enseignement habituel ?
- Est-il possible d'établir un lien avec la mise en oeuvre d'hypothèses, par la nature des justifications par exemple ?
- Un progrès apparaîtra-t-il pour chacun des concepts I, U, R... ?
- Les acquis seront-ils stables dans le temps : que restera-t-il six mois ou un an plus tard ?

Voici quelques questions auxquelles nous souhaitons donner une réponse à partir de nos observations.

En conclusion, nous aurons donc l'occasion :

- de rechercher des évolutions au sein de la séquence par comparaison avec l'état initial, ou le stade antérieur d'apprentissage, en lien avec la mise en oeuvre des hypothèses : évolution des représentations, du vocabulaire, de la nature des justifications...
- de faire des observations vérifiant le respect des hypothèses, telle par exemple : la maîtrise des prérequis à la d.d.p. a-t-elle été assurée pour tous ?

- d'utiliser des repères extérieurs : ces hypothèses conduisent-elles à un enseignement permettant aux élèves de mieux maîtriser les concepts de l'électrocinétique ? Qu'en est-il de la maîtrise de chacun : I, U, R, de la notion de circuit, système en interaction ? Qu'en est-il dans la durée ?

c – Intérêt de la prise de repères extérieurs

En pratique, il y a eu des prises de repères aux deux extrémités de la séquence :

- *avant tout enseignement en seconde*, afin de s'assurer que notre classe est comparable aux autres, que l'état initial est bien le même ;
- *après enseignement*, une nouvelle comparaison s'impose. Partant d'un état initial comparable, l'état final l'est-il aussi, sinon quelles différences observe-t-on ? Peut-on émettre une hypothèse sur leur origine ? Peut-on établir un lien avec les hypothèses ?

d – Observation de l'influence d'autres paramètres

Nous avons signalé des particularités propres à chacune des classes ayant participé aux questionnaires ou à l'enseignement. Cette hétérogénéité qui limitera certaines de nos conclusions peut aussi représenter une richesse à exploiter :

- si on néglige le facteur section (en ne prenant que des sections scientifiques à Brive, par exemple), les progrès cognitifs observés, ou d'autres effets des hypothèses, sont-ils comparables :
 - o entre sections scientifiques de Brive ;
 - o entre sections indifférenciées des autres académies ?
- si on peut choisir des sources qui permettent de négliger le facteur section, peut-on négliger le facteur enseignant ? Chacun a son histoire, son vécu d'enseignant auquel s'ajoutent les moyens limités de transmission de la séquence. D'ailleurs, certaines réactions, telles celles de Nantes, illustrent des incompréhensions au niveau de l'intérêt de la démarche lente et « répétitive ». Malgré tout :
 - o peut-on rapprocher le niveau cognitif atteint par une classe de celui d'une autre ayant appris avec la séquence ?
 - o dans quelle mesure peut-on attribuer les différences à un effet personnel de l'enseignant quant à la mise en oeuvre de la séquence ?
- si on néglige le facteur enseignant (tout en sachant qu'il joue un rôle), les progrès cognitifs observés, ou d'autres effets des hypothèses sont-ils comparables entre les élèves
 - o d'une section scientifique de Brive et ceux
 - o d'une section indifférenciée de Brive ou encore
 - o d'une section indifférenciée des autres académies ?

Par ailleurs, lors du passage du questionnaire en 1^{er}S nous avons, à notre grand étonnement, observé des progrès entre les réponses fournies par les mêmes élèves en fin de seconde et en fin de première : nous trouvions en 1^{er}S un plus grand nombre d'élèves fournissant la réponse correcte, moins d'élèves au raisonnement séquentiel... Quelle pouvait en être l'origine ? Un enseignement de l'électricité avait-il été dispensé à ces élèves entre le passage de ces deux questionnaires ?

Une seule possibilité est apparue : certains élèves de 1^{er}S suivaient l'option sciences expérimentales. Cet enseignement était de plus, pour la partie sciences physiques, dispensé par le chercheur. Il débutait, lors de la première séance par un questionnaire d'électricité, suivi de tests d'hypothèses. Les observations expérimentales suscitaient étonnement et questions chez les élèves et étaient l'occasion de mises au point, qualitatives, illustrées d'analogies, sur les bases de l'électrocinétique.

Cette observation nous a conduit à émettre l'hypothèse que la source de progrès résidait au niveau de cette opportunité de remédiation qu'apportait cette option sciences expérimentales : une seule séance de trois heures de T.P. avait suffi à provoquer une évolution sensible des représentations chez ces élèves que l'on est en droit d'imaginer intéressés.

B - La séquence

(Annexe V)

Dans le cadre constructiviste, nous essayons de faire construire le maximum de connaissances par l'élève... mais nous estimons impensable de tout lui faire construire. Une partie de la connaissance est transmise, toujours en réponse à un besoin de l'élève, à une question. Nous pensons que ce que nous avons suggéré ou transmis, l'élève a besoin de se l'approprier (pour qu'elle acquiert du sens) et de le reconstruire pour lui-même avec ses propres structures cognitives. Dans ce but nous lui proposons immédiatement différentes situations, occasions de réinvestissement, de mise à l'épreuve par l'élève de cette connaissance, qui seule lui permet de prévoir ou d'interpréter les phénomènes qu'il observe.

Cette hypothèse concernant l'apprentissage est à l'origine de la démarche suivie en vue de la construction d'un concept et reprise pour la construction de chaque concept.

I - Démarche de construction d'un concept

Cette démarche a été conçue à partir des hypothèses à valider par la mise en œuvre de la séquence. Plaçons nous au début de l'apprentissage avec le concept de d.d.p., choisi comme premier, car présenté comme étant la cause de l'existence d'une circulation dans un circuit : comment a-t-il été introduit ?

Notre première hypothèse implique maîtriser les prérequis : s'il y a maîtrise des prérequis considérés indispensables à un apprentissage, cela permettrait d'entraîner un plus grand nombre d'élèves dans cet apprentissage, ce qui améliorerait le résultat de cet apprentissage.

Cette hypothèse nous a conduit à rechercher les connaissances nécessaires à la construction de ce concept. Nous y avons trouvé les notions de circuit et de circulation. Pour établir un état des connaissances à leur sujet, nous avons fait passer un questionnaire. Nous devons nous assurer qu'il soit intelligible, c'est à dire vérifier que l'élève sache déchiffrer un schéma électrique en :

- leur demandant de représenter les éléments les plus simples : une pile, une ampoule et surtout l'interrupteur lorsqu'il est ouvert et lorsqu'il est fermé ;
- dessinant au tableau les différentes représentations observées, en vue d'une mise en commun, d'une discussion et de la sélection des schémas conventionnels (on efface ceux qui ne le sont pas), à mémoriser et d'abord à recopier sur une première fiche mémoire.

Le questionnaire préliminaire ayant pour but « la recherche de l'existence d'une circulation quelque part dans un circuit lorsqu'il est ouvert et dans la pile en circuit fermé ou ouvert » (Annexe : Séquence p. 3) a révélé l'ignorance par plus de la moitié de la population qui arrive en seconde de ces prérequis. Par exemple :

- la moitié imagine un courant quelque part lorsque le circuit est ouvert ;
- une plus forte proportion se demande si la pile participe à la circulation lorsque le circuit est fermé.

Ainsi le circuit n'est pas fermé et le concept de circulation reste à construire. Ce constat s'est renouvelé quel que soit le lieu, ou l'année de l'expérimentation de la séquence. La volonté de partir de l'état réel des connaissances nous a conduit à démarrer par un enseignement de ce que nous considérons comme une base minimale, à savoir le circuit et la circulation. Nous souhaitons amener l'élève à se représenter (Séquence, p. 10) :

- le circuit comme une boucle fermée, y compris à l'intérieur de la pile ;
- le courant comme une circulation ordonnée de charges ;
- aucune circulation nulle part en circuit ouvert, quelle que soit la cause de cette ouverture.

Ce premier enseignement a emprunté une démarche qui sera reprise à chacune des étapes de l'apprentissage :

1 – Première étape : un questionnaire

La première étape est un travail individuel : il demande de répondre à un questionnaire. Son but est double :

- il oblige l'élève à réfléchir, à formuler sa représentation, parfois ses questions face à la situation abordée (une pile est-elle traversée par un courant ???), à préciser sa pensée ;
- il donne à l'enseignant accès aux représentations de ses élèves.

Il arrive qu'en présence d'une réponse inattendue ou imprécise, difficile à interpréter, le chercheur demande à l'élève (rapidement en classe, ou plus longuement en entretien) des précisions, des explications. Le but est de pouvoir adapter les aides envisagées ou de tenir compte d'erreurs au niveau du sens des mots afin que chaque élève puisse progresser à partir du niveau de compréhension où il se trouve en lui fournissant le maximum d'occasions de comprendre.

2 – Deuxième étape : communication de la prévision de l'élève à ses voisins

Cette étape d'interaction sociale en classe, se vit en équipe de 3 à 4 élèves qui mettent en commun leurs réponses. Elle demande que chacun :

- argumente son point de vue, et
- sache écouter, entrer, pénétrer dans l'univers de l'autre et peut être y découvrir une faille, ou des éléments intéressants.

Lors du premier questionnaire cette étape est particulièrement source d'étonnement, car ils étaient sûrs de leurs prévisions, vraiment certains... et constater que le voisin en a une autre, qu'il peut parfois défendre avec autant de virulence que soi, ébranle ses certitudes.

3 – Troisième étape : partage des prévisions avec l'ensemble de la classe

Cette étape où l'enseignant organise le débat scientifique en classe, élargit la démarche précédente au groupe que constitue la classe. Elle fait passer la représentation personnelle du domaine privé au domaine public où leur diversité devient une évidence. La prise de conscience de l'existence de plusieurs prévisions, au milieu desquelles chacun devient incapable de démêler le vrai du faux, autorise l'enseignant à proposer que chacune prenne le statut d'une véritable hypothèse. Comment savoir laquelle est la bonne ? Ils ont souvent l'idée de recourir à l'expérience : l'observation attendue devrait contredire ou confirmer l'hypothèse de chacun. Le plus souvent le schéma du circuit fait partie de l'intitulé de la question ce qui facilite la mise en oeuvre de l'expérience.

4 – Quatrième étape : expérimentale

Par groupe de deux, les élèves réalisent le montage comprenant une pile, une ampoule un interrupteur auxquels ils ajoutent 2 ampèremètres, peut-être trois... reliés par des fils. Pendant ce temps ils se posent des questions :

« Que va-t-il se passer ? » « Est-ce ce que j'avais prévu ? » « Sinon, pourquoi ? »

Ils sont très actifs, recommencent le montage en cas d'observation surprenante. Si elle se renouvelle ils appellent l'enseignant au secours, l'observation paraissant inexplicable dans leur cadre interprétatif. Il se crée un conflit cognitif dont ils ont envie de sortir.

L'élève doit alors remplir la deuxième partie de sa feuille de questionnaire : le haut est consacré à la question et à ses prévisions personnelles, le bas au travail en classe. Il note les hypothèses retenues, c'est à dire les questions qui se posent avant de réaliser l'expérience. En réponse, il rédige ses observations et essaie de conclure, c'est à dire d'écrire l'hypothèse qui se trouve validée par l'expérience, les autres se trouvant contredites. Il arrive qu'il reste des questions, comme ici, la participation de l'intérieur de la pile à la circulation qui nécessitera une autre approche.

Ce travail terminé, il y a mise en commun au niveau de la classe, discussion et formulation de la conclusion de la classe avec des mots intelligibles par tous.

Ainsi chaque élève a fait sien un problème qu'il avait en charge de résoudre. Il y a eu émission d'hypothèses et une démarche de test d'hypothèses dans laquelle tout élève se trouve engagé. Tous les élèves déploient spontanément une activité surprenante au regard de leur passivité, de l'inertie de certains en cours magistral.

5 – Cinquième étape : les apports du maître

A ce stade, nous pensons avoir ébranlé leurs représentations et suscité le besoin d'une explication en réponse à une attente : les structures d'accueil sont préparées à recevoir une connaissance nouvelle. Nous avons fait le choix de travailler dans le domaine qualitatif, tout d'abord en reliant des mots à des images de la vie courante, afin de leur donner un contenu, une consistance, une image, une représentation.

C'est ainsi que nous leur demandons des exemples pris dans la vie de tous les jours où ils emploient le mot « courant » (Séquence p. 10) : les exemples ne manquent pas. Ayant présent à l'esprit leur représentation statique du courant, nous leur demandons comment ils se représentent un courant d'air, un fleuve qui a du courant. Est-ce quelque chose :

- d'immobile, de statique, qui reste en place, ou au contraire
- qui contient une idée de mouvement ?

Ils s'accordent sur le mouvement... idée qui sera à préciser, car il peut être désordonné et statistiquement immobile, ou ordonné ce qui correspond à un mouvement d'ensemble ayant un sens...

Nous effectuons le même travail avec le mot « circuit » (Séquence p. 11) et le mot « circulation ».

Ensuite, ayant une image du courant, du circuit et de la circulation dans la vie de tous les jours, nous allons tenter de les réunir au sein du circuit électrique (fermé dans un premier temps) en exploitant nos observations expérimentales.

Nous avons aussi besoin de nous souvenir du modèle atomique, pour avoir une représentation de l'intérieur du fil électrique compatible avec l'existence d'une circulation de charges électriques.

La nécessité de la fermeture du circuit apparaît pour que la circulation d'un courant soit possible : la pile doit faire partie de la chaîne conductrice.

Cette première représentation d'un circuit siège de la circulation d'un courant peut être complétée par une autre aide qualitative : l'analogie avec la chaîne de vélo. Elle permet de plus d'aborder les aspects liés à l'énergie dans les deux systèmes (Séquence, p. 16).

Puis nous passons aux questions sur le circuit ouvert : c'est l'occasion de réinvestir les images, les définitions, les explications et l'analogie du circuit et de la circulation. Que se passe-t-il alors au niveau des fils, de l'ampoule, de l'interrupteur ou de la pile... ? Ces réflexions sont complétées par la recherche de causes « naturelles » d'ouverture d'un circuit, telle une lampe en panne, une diode à contre sens, un fusible « grillé »...

6 – Sixième étape : les réinvestissements

Des apports théoriques ayant été fournis pour illustrer la représentation du circuit (boucle fermée) et de la circulation (mouvement ordonné de charges) du physicien, nous leur proposons de réinvestir cette connaissance nouvelle : à ce stade nous pensons qu'ils l'ont accueillie en réponse à une question posée sur un exemple qui reste un cas particulier, mais qu'elle n'a pas définitivement remplacé la connaissance initiale. La connaissance première, construite au fil de ses expériences quotidiennes, était bien établie. Pour stabiliser une nouvelle représentation, elle devra se montrer toujours plus performante que l'ancienne, et pour cela avoir été testée et mise en œuvre sur des situations variées... Malgré cela nous savons que, selon la question, plusieurs représentations coexistent le plus souvent dans la tête de l'élève qui, selon le cas, fera appel à l'une ou l'autre...

Le but de cette étape est double : nous avons dit que le modèle a une fonction de représentation mais aussi d'interprétation. C'est un instrument de prévision et d'explication. En proposant de réinvestir le modèle élaboré, nous cherchons à savoir à quel stade de la représentation du circuit et de la circulation se trouve chaque élève, à partir de ses prévisions. Pour l'élève :

- soit l'expérience confirmera sa prévision et il saura l'interpréter : elle élargit la validité de la connaissance nouvelle ;
- soit elle sera de nouveau à l'origine d'un conflit : c'est une perche tendue, une nouvelle occasion de faire évoluer ou de changer de représentation pour une autre plus performante.

Le nouveau questionnaire porte sur un circuit composé avec deux ampoules dont le montage diffère d'un questionnaire à l'autre : elles se trouvent montées en série ou en dérivation. La démarche reprend les quatre premières étapes : réponse individuelle, mise en commune des prévisions et émission d'hypothèses, test expérimental des hypothèses et conclusion. Cette fois-ci, ils sont généralement plus nombreux à fournir des prévisions correctes. On peut toutefois noter l'origine des erreurs les plus fréquentes sur le circuit fermé : un raisonnement séquentiel sur le montage en série et une erreur de lecture sur le montage en dérivation : l'interrupteur commanderait les deux lampes (à l'origine de la 7^e étape, voir paragraphe suivant)

Généralement lorsque l'expérience contredit la prévision de l'élève, il est alors capable d'expliquer ce qu'il observe. Parfois cela nécessite l'aide de son voisin.

7 – Septième étape : le schéma électrique

Ce travail s'est révélé nécessaire à la suite des questions précédentes où les élèves font souvent une lecture géométrique d'un schéma : des dipôles dessinés alignés sont considérés montés en série et ceux géométriquement parallèles en dérivation. Nous avons cherché à les aider à lire sans faute la nature du montage d'un dipôle, prérequis indispensable pour ensuite appliquer correctement les propriétés des concepts d'intensité ou de différence de potentiel. (Séquence, p.19)

8 – Etape finale : l'évaluation

Son rôle est double :

- la vérification que le niveau de connaissance de ces notions permet d'envisager de passer à l'étape suivante de l'apprentissage, c'est à dire le concept de d.d.p.
- mais aussi, lors de la « correction » expérimentale, l'analyse de ces situations nouvelles, sortes de réinvestissements, sont l'occasion d'explications complémentaires. Elles fournissent l'opportunité de s'approprier la connaissance qui était le but de l'apprentissage, non par rabâchage, mais par mise à l'épreuve de sa pertinence, de sa puissance d'explication.

Il nous semble que les réinvestissements ne pénalisent pas les bons élèves qui y trouvent des occasions d'élargir progressivement le champ d'application, ce qui participe à l'apprentissage.

La correction se fait en reprenant les étapes 2 à 4 où les observations peuvent être interprétées avec l'aide de l'analogie...

L'approche du concept de d.d.p. reprendra les étapes 1 à 6 en partant de la question : « Q'est-ce qui met la chaîne en mouvement ? », c'est à dire une approche qualitative, les essais préliminaires ayant révélé une absence totale de représentation de ce concept.

- étape 1 : questionnaire préliminaire
- étapes 2 - 3 : mise en commun des prévisions et émission d'hypothèses
- étape 4 : test d'hypothèses expérimental : attribution de propriétés au concept
- étape 5 : apport théorique d'une analogie utilisée pour interpréter les observations
- étape 6 : réinvestissements
- dernière étape : évaluation

Résumé : La démarche suivie en vue de la construction d'un concept peut être résumée en lien avec nos hypothèses, par exemple pour la différence de potentiel (d.d.p.) :

1 – **Vérifier la maîtrise des prérequis :** représentation du circuit et de la circulation mais aussi maîtrise du schéma électrique. Un questionnaire préliminaire a établi le constat de leur absence ce qui nous a conduit à les faire apprendre, les considérant comme une base indispensable pour construire les autres concepts.

2 – **Procéder à une approche qualitative :**

- a – l'enseignement démarre sur un questionnaire qualitatif : son but est la dévolution d'une question à l'élève qui cherchera à vérifier ses hypothèses, par
- b - une expérience, dont les observations le plus souvent qualitatives doivent le surprendre et le mettre en recherche d'une explication

c – qui sera apportée par un pair ou le maître, qui se sert souvent

d - d'une image, d'une analogie pour faire comprendre : elle tient compte de la recherche d'explication des échanges énergétiques dont le circuit est le siège :

3 – **Une approche énergétique :** par l'analogie de la chaîne de vélo.

Nous procéderons à une **approche indépendante** de chacun des concepts de l'électrocinétique : on posera d'abord la question « qu'est-ce qui met la chaîne en mouvement ? » et le premier concept sera introduit par son rôle causal :

- a - la d.d.p. : son approche sera qualitative (voir ci-dessus 2 – a – b – c – d) et énergétique (3)
- b – puis la même démarche sera reprise pour le concept d'intensité...

II - L'activité de l'élève qui apprend avec la séquence

Pour l'élève, le but de la séquence est l'acquisition d'une connaissance nouvelle. Nos analyses révèlent que l'élève est un sujet connaissant qui doit agir pour apprendre : son activité est donc essentielle dans le processus d'apprentissage. Tout au long de la séquence il vivra des interactions entre sa connaissance initiale et :

- la tâche proposée,
- les autres, et
- le maître,

qui joueront le rôle de médiateurs de cet apprentissage, en favorisant son questionnement pour l'impliquer dans une démarche qui lui permette d'acquérir un savoir, à partir de ses erreurs, en réponse à une question.

Nous allons préciser les activités de l'élève au cours des phases de l'apprentissage. Nous pouvons déjà signaler que le moteur est constitué du couple « **étonnement – questionnement** ».

1 – L'élève et les questionnaires

Avant chaque apprentissage, la première activité proposée par le maître est un questionnaire. Nous avons expliqué leur origine et leur but : le maître sait que l'élève arrive avec des connaissances qui peuvent correspondre ou ne pas correspondre à celles qui feront l'objet de l'apprentissage. Il souhaite faire accepter à l'élève de leur donner le statut d'hypothèse réfutable à valider.

a – Activité de réponse aux questions

L'élève répond aux questions à l'aide de ses représentations, d'abord par une réponse spontanée, rapide (case à cocher, par exemple), puis il doit exposer plus en détail quelles sont ses prévisions par des justifications. Le questionnaire oblige à exposer l'état de sa connaissance, et par là même à en prendre conscience.

b – Mise en commun des réponses

Le maître demande à l'élève d'exposer son point de vue aux autres, de l'argumenter, de le défendre. Dans le même temps il lui demande d'être à l'écoute de l'autre, de sa façon à lui de se représenter la situation : il lui demande de prendre en compte la différence entre ce qu'il pense et ce que l'autre lui expose.

En apprenant à communiquer, à écouter l'autre, à échanger des arguments ou à confronter des idées, l'élève prend conscience de ce qu'il croyait savoir et, souvent avec surprise, de l'existence d'autres représentations, qui dans un premier temps peuvent lui apparaître tout aussi défendables. Il se crée une interaction entre cet apport extérieur d'informations et celles présentes chez l'élève. Passé le stade de l'**étonnement** vient celui du **questionnement**.

La situation proposée qui apparaissait simple, à la réponse évidente, prend un autre caractère. Elle devient énigmatique, problématique, à l'origine de questions : l'élève se trouve entraîné dans une activité de résolution de problème. La situation devient propice à l'émission d'hypothèses. Les différentes prévisions prennent un statut hypothétique. Ne sachant pas dire laquelle est la bonne, elles deviennent autant d'hypothèses à tester... comment ? En réalisant l'expérience.

2 – L'élève et l'expérience

L'élève aborde l'expérience muni d'une question à laquelle il souhaite trouver une réponse. La diversité des points de vue a donné à la situation un caractère énigmatique que l'élève a envie de résoudre.

Le montage est vite bouclé : réaliser un circuit ne présente généralement pas de difficulté à ce niveau d'étude. Après deux ans de présence de l'électricité dans les programmes du collège, réaliser un montage est une activité familière.

a – Observations

L'élève a tout d'abord à exprimer par écrit ses observations. Souvent elles contredisent ses prévisions : la distorsion entre ses prévisions et les résultats expérimentaux crée un étonnement, une curiosité et la recherche

d'une explication. Ses prévisions confrontées à celles de ses camarades, puis à des observations expérimentales inattendues le conduisent à un conflit cognitif. On pourrait imaginer qu'il en sorte seul en raisonnant sur le mode hypothético-déductif : parmi les hypothèses en présence figure généralement la solution du problème... C'est oublier d'une part la ténacité des représentations et d'autre part que cette démarche ne lui est pas familière, pour tout dire inconnue.

b – Test d'hypothèses

Souvent c'est le maître, appelé à l'aide, qui va inviter l'élève à considérer toutes les hypothèses et lui demander, en fonction de ses observations, laquelle paraît confirmée par l'expérience et permettrait son interprétation... Si on s'arrêtait là, cette explication risquerait de rester au niveau du cas particulier.

3 – L'élève et la connaissance nouvelle

a – Passage du niveau des événements au niveau des concepts

Entre les faits observés et leur interprétation, le physicien fait un détour par le modèle. En effet une théorie physique n'a pas pour objectif de décrire le réel mais une fonction de représentation : elle sert à prédire et à expliquer le phénoménal à l'aide d'outils pour penser que sont les concepts.

Ce saut cognitif, l'élève ne peut l'effectuer seul. Il nécessite un apport d'informations extérieures lorsque le besoin s'en fait sentir.

b – Prise en compte de la connaissance nouvelle

L'élève se trouvait face à une observation incompréhensible pour lui, constituant un problème qui a du sens car il a contribué à son élaboration. Il est à la recherche d'une solution. Le maître propose une hypothèse (un germe de modèle) qu'il demande à l'élève de considérer pour construire une représentation de la situation expérimentale. Il apparaît une interaction entre cet apport extérieur et la représentation de l'élève. Si on en restait là, l'élève mémoriserait (dans les bons cas) que dans cet exemple particulier la réponse est... mais conserverait sa représentation pour toutes les autres situations. L'élève a besoin de tester sur d'autres exemples l'intérêt du modèle fourni, pour en mesurer l'utilité, la valeur d'usage et l'adopter.

c – Appropriation de la connaissance nouvelle

Dans ce but, le maître propose de nouvelles situations expérimentales au sujet desquelles il demande des prévisions :

- certains élèves utilisent toujours leur représentation initiale pour prédire ;
- certains élèves se posent des questions, ne savent pas très bien dire ce qui va se passer, hésitent entre le nouveau modèle qui les surprend « c'est bizarre » et l'ancien plus sécurisant ;
- certains se sont emparés du nouveau modèle, sans doute dans l'idée de tester son pouvoir prédictif.

L'activité de l'élève reprend alors les étapes 1 et 2, mais il arrive qu'il y ait encore un besoin d'explication, besoin qui peut parfois être satisfait par un pair.

Pour s'approprier le modèle, l'élève doit prendre en compte des informations qui dérangent ses habitudes de penser. Pour franchir ce cap, il doit être convaincu de l'intérêt en l'ayant expérimenté sur des situations différentes. C'est l'un des rôles des réinvestissements prévus.

Remarques :

1 - Tout au long de cette activité, l'élève rédige des prévisions, des observations, des interprétations, des justifications qui sont autant de documents disponibles pour les analyses qui nous permettront de tenter de répondre aux questions que nous nous sommes posées.

2 - Lors de nos analyses nous avons signalé notre intérêt pour les objectifs généraux de la chimie où les activités conseillées pour l'élève sont :

- *découvrir, observer, analyser, mesurer*
- *raisonner ... :*
 - o *le raisonnement qualitatif*

- le raisonnement par analogie
- expérimenter
- modéliser : développer l'utilisation d'un modèle, en montrer les limites, le sophistiquer en fonction des besoins ...

Ces verbes d'action semblent bien résumer l'activité de l'élève, intense et variée, centrale au cours des étapes d'apprentissage de la séquence.

III - Plan de la séquence et durée de l'expérimentation

1 – Plan de la séquence (Annexe V – 1-2)

Le plan découle de la démarche adoptée, elle même en lien avec les hypothèses. Il nous paraît plus clair de le présenter sous forme de tableaux dans les pages qui suivent :

1 ° Etape : Circuit – Circulation

Circuit - Circulation		Horaire	
Déroulement	P.	Cours	T. P.
Questionnaire	4 - 9	1 h.	
Exploitation : I – Le circuit fermé II – Le circuit ouvert	10 - 15		1 h. 30
Cours Récapitulatif III – Analogie Questionnaire « Réinvestissement »	15 16 - 18	1 h.	
Exploitation : IV - Réinvestissement V - Le schéma électrique	18 – 19 19 - 20		1 h. 30
Evaluation	21 – 26	1h.	
Questionnaire préliminaire à la d.d.p.	27 - 28 31 - 32	+ à la maison	

2 ° Etape : Le concept de d.d.p.

Le concept de d.d.p.		Horaire	
Déroulement	P.	Cours	T. P.
Evaluation Circuit-circulation			1 h. 30
d.d.p.: I – Approches III - Analogie	35 - 36 38	1 h.	
Exploitation du questionnaire	37		1 h. 30
IV – La d.d.p. entre deux points Questionnaire « Réinvestissement »	44 – 48 29 – 30 33 - 34	1 h.	
V - Réinvestissement	48 - 49		1 h. 30
Evaluation	50 - 53	1 h.	
Evaluation			1 h. 30

3 ° Etape : Le concept d'intensité

Le concept d'intensité		Horaire	
Déroulement	P.	Cours	T.P.
Questionnaire préliminaire	54 - 57		
Rappel analogie chaîne de vélo	64	1 h.	
I - Expériences :			
Exploitation du questionnaire	58 - 60		1 h. 30
II - Rappels et définitions	61 - 63	1 h.	
III - Lois de l'intensité	63 - 67		
Questionnaire « Réinvestissement »	68 - 75	à la maison	
IV - Réinvestissement	76 - 78		1 h. 30
Evaluation	79 - 82	1 h.	
Evaluation			1 h. 30

4 ° Etape : Le concept de conducteur résistant

Le conducteur résistant		Horaire	
Déroulement	P.	Cours	T. P.
« Le jeu des résistors »	83 - 85		3 / 4 h.
Exploitation :			
I - Expériences qualitatives	86 - 87		3 / 4 h.
I - Expériences quantitatives : Loi d'Ohm	87 - 88		
II - Association de conducteurs Ohmiques	88 - 90	1 h.	
Exercices		1 h. + à la maison	

5 ° Etape : le circuit électrique

Le circuit électrique		Horaire	
Déroulement	P.	Cours	T. P.
I - Les générateurs de tension continue	91 - 92		
II - Le circuit	93 - 94	1h.	
Générateur idéal ou pas ?	96		1 h. 30
Evaluation en fin de seconde			

2 – Durée de l'expérimentation de la séquence

Une expérimentation nécessite environ 10 h. de cours classe entière et au moins dix séances de T.P. soient quinze heures par demi-groupe, ce qui conduit à un total de 25 heures, soit environ le premier trimestre... parce que les élèves arrivaient en seconde dépourvus de toute représentation des concepts du physicien, à peu près comme des élèves arrivent en 4°. Si cette démarche se trouvait répartie sur deux à trois années, cela ne dépasserait pas l'horaire officiel de ces trois années. De l'étalement dans le temps on serait en droit d'attendre un bénéfice supérieur car il y aurait moins de lassitude de la part des élèves, et des rappels, des réinvestissements d'une année sur l'autre plus profitables à l'acquisition de connaissances.

Par ailleurs la séquence a été expérimentée quatre années de suite, chaque fois avec au moins deux classes :

1996 - 97	le chercheur avec deux classes	(essai préliminaire, test de faisabilité)
1997 - 98	le chercheur avec deux classes	(permet la mise au point définitive de la séquence)
1998 - 99	le chercheur avec deux classes, son stagiaire avec une classe, un collègue avec une classe ;	
1999 - 00	le chercheur avec une classe, et des expérimentateurs d'autres académies :	
	Grenoble	M.C.G. une classe
	Lille	M.G.D. deux classes
	Nantes	stagiaires deux classes.

Résumé de l'expérimentation

A / Méthodologie

I – Les acteurs de l'expérimentation

Deux années d'expérimentation par le chercheur ont permis la rédaction du texte définitif de la séquence, d'étendre son expérimentation à des **enseignants** de Brive, puis d'autres académies. Ils n'ont reçu aucune formation particulière, le seul critère de « sélection » était le volontariat.

Les **élèves** formaient une population disparate : ceux de Brive étant regroupés selon que leur projet professionnel nécessitait un baccalauréat scientifique ou sciences économiques, alors que ceux des autres académies constituaient des classes indifférenciées.

II – Recueil et analyse de données

1 – Données recueillies

Les données recueillies sont essentiellement des traces écrites sous forme de **réponses à des questionnaires « papier-crayon »** :

- avant enseignement elles donnent accès aux représentations initiales des élèves ;
- lors du réinvestissement puis de l'évaluation, elles permettent de suivre l'apprentissage de chaque élève.

Nous disposons également d'**entretiens** effectués :

- lors des essais préliminaires pour préciser les représentations de certains élèves et comprendre des prévisions inattendues comme le viol de la loi des nœuds ;
- lors de la prise de repères externes pour expliquer l'origine de l'absence de réponse de certains élèves : en fait ils étaient dépourvus de représentation.

Dans tous les cas ils ont offert à l'élève l'opportunité d'une remédiation.

Les **réactions des partenaires** de la séquence ont été essentiellement positives :

- les élèves actifs, curieux, intéressés en classe, se rendaient volontiers aux entretiens dont ils repartaient heureux de commencer à comprendre ;
- les enseignants avaient eux l'impression que « le courant passait mieux » et jugé judicieux pour la compréhension l'analogie de la chaîne de vélo.

2 – Analyses prévues

a – Analyses en lien avec les hypothèses de construction de la séquence

- **en lien avec la maîtrise des prérequis** : les concepts de circuit et de circulation étaient-ils connus des élèves ? Sinon, leur enseignement a-t-il modifié les prévisions sur le circuit, ouvert en particulier ?
- **en lien avec l'approche énergétique** : aborder le circuit d'un point de vue de l'énergie a-t-il permis une diminution des interprétations énergétiques, ainsi que du raisonnement séquentiel ?
- **en lien avec l'approche qualitative** : les justifications des élèves révèlent-elles une prise de sens par formation d'images qualitatives ?
- en lien avec le **bouquet d'hypothèses** : observera-t-on un progrès cognitif ?

Si nous observons un **chemin d'apprentissage** des élèves correspondra-t-il au chemin cognitif observé par J.L. Closset ?

b – Analyses en lien avec la prise de repères externes

La prise de repères avant enseignement, en fin d'année de seconde, puis de première permettra de dire si l'état initial était comparable, ce qu'il est devenu en fin d'année, puis un an plus tard.

c – Recherche de l'influence d'autres paramètres

Par exemple, on pourra tenter d'évaluer l'influence pour l'élève de suivre :

- une classe scientifique ou indifférenciée,
- l'enseignement de l'option sciences expérimentales en 1^{er} S (électronique).

B / La séquence

I - Démarche de construction d'un concept

Elle se situe dans un cadre constructiviste où l'enseignant tente de faire construire un maximum de connaissances par l'élève. Mais l'élève ne peut pas tout construire seul : une partie de la connaissance doit lui être transmise. Il reste à la charge de l'élève de se l'approprier à l'occasion de réinvestissements sur des situations voisines.

La démarche suivie pour la construction de concepts est toujours la même :

- 1° étape : un questionnaire préliminaire qualitatif auquel l'élève répond à l'aide de ses représentations ;
- 2° étape : mise en commun des représentations : les élèves les expriment et les discutent ;
- 3° étape : formulation des hypothèses retenues, à tester par l'expérience ;
- 4° étape expérimentale de test d'hypothèses : l'observation de l'expérience qui contredit les prévisions rend la situation encore plus énigmatique, met l'élève en quête d'explications ;
- 5° étape : apports du maître en réponse aux questions : ce peut être la définition d'un concept, complétée par une image ou une analogie ;
- 6° étape : réinvestissements ou remédiations selon les élèves, à partir d'un nouveau questionnaire qui demande de nouvelles prévisions qualitatives, qui seront suivies de nouvelles expériences test d'hypothèses. Les observations nécessiteront la mise en œuvre du modèle proposé pour devenir intelligibles ;
- Etape finale : l'évaluation, sous forme de questions, dont la correction sera sous forme expérimentale de test d'hypothèses, ultime tentative pour inciter tous les élèves à se servir du modèle.

II – Activités de l'élève qui apprend avec la séquence

L'élève met en œuvre ses représentations pour fournir une réponse écrite aux questions, puis il doit exposer et justifier ses prévisions à la classe.

Certains élèves sont déstabilisés devant la diversité des prévisions, alors que d'autres sont vraiment certains de ce qu'ils affirment. Ces prévisions deviennent des hypothèses à tester.

Le montage est très vite réalisé : l'élève en attend la confirmation de ses prévisions. Sinon, il refait le circuit, observe celui des autres tables : alors il manifeste son étonnement, son incompréhension : la situation est vraiment énigmatique. Un voisin ou le maître lui demande de considérer d'autres hypothèses : laquelle se trouve confirmée par l'expérience ?

Il se peut aussi que le maître ait à introduire un concept, ou à proposer un modèle qu'il demande à l'élève de considérer pour interpréter les faits observés.

Cette connaissance nouvelle, l'élève doit se l'approprier : c'est le rôle de réinvestissements avec les mêmes tâches pour l'élève à partir de situations nouvelles proposées par un nouveau questionnaire.

III – Plan de la séquence

1 – Plan

- 1 – Circuit, circulation
- 2 – Concept de d.d.p.
- 3 – Concept d'intensité
- 4 – Le conducteur-résistant
- 5 – Le circuit électrique

2 – Durée

10 h. de cours et 10 séances de T.P. (15 h.) . Elle gagnerait à être étalée dans le temps. Ne nécessitant aucun savoir initial, elle pourrait débuter en 4° et se poursuivre en 3°.

Troisième partie

RESULTATS

A - En termes de suivis

Nous cherchons à mettre en évidence les étapes par lesquelles passe l'élève au fur et à mesure qu'il progresse dans l'acquisition du concept d'intensité. Dans ce but, nous devons suivre, élève par élève, le raisonnement qu'ils empruntent pour répondre aux questions portant d'abord sur le circuit simple, puis sur un circuit mixte. Au sein de ces circuits, il arrive que la valeur d'une résistance varie et nous observons comment ces modifications sont perçues par les élèves.

I - Documents disponibles

Lors de l'expérimentation en 1999-2000 nous avons demandé aux enseignants de recueillir tous les documents rédigés par les élèves afin de suivre l'évolution de leurs représentations. Lille et Nantes nous ont fourni des documents trop souvent sans nom, ce qui ne permettait pas la réalisation de suivis. Pourquoi ?

Les questionnaires sont habituellement anonymes : nous avons laissé anonymes les questionnaires passés aux populations extérieures à la séquence, mais, lorsque le chercheur fait passer un questionnaire à ses élèves, il le relève pour prendre connaissance des représentations de sa population, puis le redistribue à la séance suivante : les noms lui sont utiles... mais surtout, lors de la mise en commun des prévisions, il peut s'assurer qu'elles se soient toutes exprimées ; lors du test expérimental d'hypothèses il peut observer les réactions en fonction des prévisions. Le contrat établi avec les élèves était clair : le but n'était pas une évaluation, mais une aide personnalisée, dont ils ont rapidement mesuré l'intérêt.

L'expérimentatrice de Grenoble possédait aussi des documents nominatifs, c'est pourquoi nous disposons de traces écrites provenant de 62 élèves appartenant à deux classes, l'une de l'académie de Grenoble et l'autre de celle de Limoges. Pour la plupart de ces élèves, nous disposons des représentations du concept d'intensité à cinq étapes de l'apprentissage.

1 - Les documents

a - Le questionnaire après enseignement de la circulation (Annexe V. 23-28)

L'objectif de ce questionnaire qualitatif était d'observer si l'élève avait construit une représentation du circuit et de la circulation. Il arrive que les réponses puissent révéler un raisonnement séquentiel ou un regard local, particulièrement les justifications de la place du fusible. C'est dire qu'une réponse correcte à ce questionnaire révèle surtout l'acquisition des prérequis à l'enseignement de l'électricité, mais elle peut cacher des raisonnements surprenants, sources de difficultés prévisibles pour la suite.

b - Le questionnaire préliminaire à l'intensité (Annexe V. 56-59)

Ce questionnaire qualitatif porte sur le circuit simple et sur le circuit mixte. Il donne accès au raisonnement de l'élève avant enseignement sur :

- le circuit simple (questions I et II) ;
- la loi des nœuds : est-elle connue ou violée, le partage égal ou différencié ?
- la branche dérivée (question III).

Il peut arriver que l'élève change de raisonnement sur le circuit simple entre la question I habituelle et la question II : c'est la même, mais avec une valeur de R qui a changé, question qui surprend souvent l'élève.

Il arrive également que le raisonnement diffère de celui emprunté pour le choix de la place du fusible lors du questionnaire précédent.

c - Le réinvestissement (Annexe V. 70-77)

Il propose un questionnaire qualitatif qui porte uniquement sur le circuit mixte. Il est passé après un début d'enseignement du circuit avec dérivation. Il s'intéresse à la branche principale, comme aux branches dérivées, lorsque la valeur de la résistance varie dans l'une d'elles.

d - Le test I et U (Annexe V. 81-84)

Les questions qualitatives portent sur le circuit série, le circuit avec dérivation et le circuit mixte, ce qui permet de disposer du raisonnement de l'élève après enseignement sur :

- le circuit série,
- la loi des nœuds,
- le circuit principal et la branche dérivée.

e – Le test final en Mai 2000 (Annexe VI. 15-23)

A Brive, le chercheur a demandé à ses élèves des révisions. Elles ont été réalisées avec d'autant plus de sérieux par certains élèves que ce questionnaire participait à la moyenne du troisième trimestre, si importante pour l'orientation en classe de première. Il a été particulièrement bien préparé par les élèves souhaitant une orientation en classe de 1^o S. C'était le vœu commun à la rentrée, mais à ce stade de l'année, des élèves conscients soit de leurs difficultés dans certaines matières scientifiques, soit du travail exigé par ces matières, ont abandonné tout effort en physique.

Remarque : cette attitude avait été demandée à tous les expérimentateurs, afin que ce questionnaire participe à l'apprentissage par des rappels et des réinvestissements, et de pouvoir vraiment atteindre le niveau de connaissance des élèves en électricité, en fin d'année.

A Grenoble, voici ce qu'écrit l'enseignante :

« Sans doute ne s'est-il pas fait dans les meilleures conditions pour toi, du moins pour ton étude... (refus des collègues de le faire passer dans leurs classes pour servir de classes témoins)... J'en ai reparlé 3 semaines avant la sortie. Là on a décidé qu'on pourrait faire cela la semaine des conseils de classe, pour que les élèves le fassent quand même sérieusement, mais sans note, et ils n'ont eu aucun programme de révisions... »

A première vue ce qui apparaît au niveau des réponses de Grenoble est :

- d'une part le manque de stabilité du raisonnement employé :
les élèves qui utilisent des raisonnements différents selon la question sont 8 / 23 soit 35 %
alors qu'à Brive ils sont 5 / 33 soit 15 %
- d'autre part une plus grande dispersion des raisonnements stables employés tout au long du questionnaire :

Nature du raisonnement stable emprunté par des élèves en Mai 2000

Raisonnement stable	Local	Séquentiel	A Courant Constant	Systémique
Lieu				
Brive	1 3,5 %	0 0 %	3 10,5 %	24 / 28 86 %
Grenoble	1 7 %	3 20 %	3 20 %	8 / 15 53 %

Ces différences s'expliquent aisément à partir du contexte dans lequel s'est déroulé chaque test final : nous devons nous en souvenir lors de son exploitation.

Dans ces deux académies il y a plus de la moitié des élèves au raisonnement stable systémique, ce qui est un réel progrès en comparaison des raisonnements au départ.

2 – L'exploitation de ces documents

Nous nous intéressons au raisonnement emprunté par l'élève, c'est à dire sa représentation du débit en différents points du circuit :

- ce débit comporte-t-il des discontinuités ?
 - o il en présente deux si le raisonnement est local,
 - o une seule si le raisonnement est séquentiel ;
- ou n'en présente-t-il pas ? Le raisonnement peut alors être à courant constant ou systémique. La question devient : la résistance a-t-elle une influence sur le débit ?

Cette grille de lecture oblige à simplifier la réalité, à ne pas prendre en compte toute la diversité des représentations utilisées par les élèves. Par exemple :

a – Nous ne nous intéressons qu'au circuit qui fonctionne

Seul le circuit sous tension nous intéresse dans la mesure où nous cherchons à observer la cohérence du raisonnement employé :

- sur le circuit simple et sur la branche dérivée lors du questionnaire préliminaire ;
- entre la branche principale et la branche dérivée lors du réinvestissement.

Ces raisonnements sont susceptibles d'évoluer avec l'enseignement, évolutions que nous comptons suivre.

Ceci veut dire que nous ne traiterons pas les raisonnements sur le circuit ouvert, mis en évidence lors du questionnaire passé en Mai 2000.

b – Influence de la résistance sur le débit

Avant enseignement, les élèves imaginent généralement une influence de la résistance sur l'intensité du courant : environ la moitié des élèves pense qu'elle le fait diminuer et l'autre moitié qu'elle l'augmente. Cette dernière représentation considère qu'une plus grosse résistance nécessite, ou laisse passer plus de courant. Lors de nos essais nous l'avons baptisée « énergétique » même si l'origine peut être mécanique ou énergétique.

Ces représentations ont été adoptées par :

17 / 35 élèves de Brive et 13 / 27 élèves de Grenoble soit 30 / 62 élèves.

Ces représentations, où le débit varie proportionnellement à la valeur de la résistance, se rencontrent avec tous les raisonnements, sauf bien entendu celui à débit constant.

En termes de suivis, la représentation « énergétique » ou non du rôle de la résistance ne nous apparaît pas comme primordiale au regard de son influence sur le débit à l'échelle de la branche ou du circuit. Par exemple, un raisonnement systémique signifiera pour nous que l'élève étend l'influence de la résistance à toute la branche, mais sa représentation du concept de résistance peut ne pas être celle du physicien. Ce cap cognitif nous semble négligeable au regard du passage du raisonnement à courant constant au raisonnement systémique.

c – Utilisation de raisonnements différents selon la question d'un même questionnaire

Nous n'ignorons pas qu'il existe un lien entre la question posée et la réponse fournie. En cours d'apprentissage, un même individu est susceptible d'emprunter différents raisonnements suivant l'expression de la question, ce qui révèle un état instable lié à l'appropriation de la connaissance nouvelle. Il sera pris en compte en tant que tel.

Au test final, éloigné de la période d'enseignement, lorsque nous avons rencontré des réponses confuses sur le circuit mixte, nous les avons ignorées : pour identifier le raisonnement de l'élève, nous avons recherché le raisonnement cohérent (s'il y en a un) utilisé sur les circuits plus simples (avec un et deux récepteurs).

d – Dossiers incomplets

Nous avons annoncé disposer des réponses à cinq étapes de l'apprentissage. C'est loin d'être vrai pour la totalité des 62 élèves, pour différentes raisons :

- le premier stade après l'enseignement de la circulation n'est pas toujours analysable en termes de raisonnement ;
- certains élèves ont été absents, ou n'ont pas rendu tel ou tel élément du dossier ;
- certaines réponses sont incomplètes ou révèlent plus un état de confusion qu'un raisonnement.

Nous ne prendrons en compte que les élèves dont nous disposons d'au moins trois étapes, ce qui élimine deux élèves de Grenoble, et ramène l'étude à trois étapes d'apprentissage pour soixante élèves.

II - Evolution du raisonnement de l'élève du circuit simple à la branche principale

1 – Elèves partant d'un raisonnement local (en partie ou en totalité)

a – Données recueillies

Nous avons rencontré quelques difficultés d'analyse, car il arrive, au sein d'un même questionnaire, que des élèves changent de raisonnement en réponse aux différentes questions. Par exemple, au questionnaire préliminaire à tout enseignement (qui nous permettait éventuellement l'accès au raisonnement initial de l'élève), nous avons trouvé quatre élèves qui, pour répondre, emploient tantôt un raisonnement local, tantôt un raisonnement séquentiel et un élève qui utilise un raisonnement tantôt local, tantôt correct. Ils se trouvent en bas du tableau.

Ces élèves à l'état initial intermédiaire feront l'objet d'un traitement particulier.

La même cause de difficulté s'est répétée à chaque étape d'observation, ainsi un élève, lors du réinvestissement passe par un raisonnement qui hésite entre le séquentiel et le systémique (?); un élève, passe par un raisonnement à courant constant puis hésite toujours entre deux raisonnements (?), enfin une élève en grande difficulté, a raisonné à courant constant, puis emprunté divers raisonnements (?) pour revenir au raisonnement local en fin d'année. Les réponses de ces trois derniers élèves font partie du recueil de données mais ne seront pas analysés, en raison de leur évolution chaotique (*).

Nous allons présenter les raisonnements successifs empruntés par les élèves au raisonnement initial à caractère local dans le tableau ci-dessous :

Etapes d'évolution du raisonnement local

(?) raisonnement changeant avec la question

Nombre d'élèves	Raisonnement initial	Raisonnement intermédiaire 1	Raisonnement intermédiaire 2	Raisonnement Final
1	Local	Correct	Systémique	Systémique
2		A courant constant	Systémique	
1		A courant constant	Séquentiel	
1		Séquentiel	Systémique	
1*		?	Séquentiel	?
1*		A courant constant	?	Local
1*		A courant constant	?	?
2	Local + Séquentiel	A courant constant	Systémique	Systémique
1		Correct	Systémique	
1		Séquentiel	A courant constant	A courant constant
1	Local + correct	A courant constant	Systémique	Systémique

b – Analyse

Sur 13 élèves repris dans le tableau précédent, au raisonnement initial à caractère local, 10 ont adopté un raisonnement identifiable à chaque étape.

Sur ces dix élèves au raisonnement initial à caractère local, 8 adoptent finalement le raisonnement systémique. Avant ce raisonnement :

5 / 8 sont passés par le raisonnement à courant constant ;

2 / 8 directement du raisonnement local au raisonnement systémique ;

1 / 8 par le raisonnement séquentiel.

Le raisonnement à courant constant paraît, à partir de ce premier petit échantillon, l'étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique. C'est également l'étape la plus fréquente après le raisonnement local, quelque soit le mode d'analyse :

5 / 8 si on ne compte que les élèves au raisonnement initial purement local ;

8 / 13 si on tient compte de tous les élèves ayant emprunté un raisonnement initial à caractère local au moins sur une question.

2 – Elèves partant d'un raisonnement séquentiel

Ce raisonnement est emprunté en début d'année par 31 élèves, soit la moitié de la population observée, et par 8 autres qui l'ont utilisé mêlé à d'autres raisonnements. Observons les étapes suivies :

a – Observations

Etapes d'évolution du raisonnement séquentiel

Nombre d'élèves	Raisonnement initial	Raisonnement intermédiaire 1	Raisonnement intermédiaire 2	Raisonnement final
9	Séquentiel	Correct	Systémique	Systémique
12		A courant constant	Systémique	
1		Correct	A courant constant	
1		A courant constant	Séquentiel	
3		A courant constant	Séquentiel	Séquentiel
1		Correct	Séquentiel	
1		Séquentiel	Séquentiel	
2	Séquentiel + Local	A courant constant	Systémique	Systémique
1		Correct	Systémique	A courant constant
1		Séquentiel	A courant constant	
1	Séquentiel + Courant constant	Séquentiel + Correct	Systémique	Systémique
2	Séquentiel + correct	A courant constant	Systémique	Systémique
1			Séquentiel	A courant constant

Remarques : 2 élèves ne figurent pas dans ce tableau car ils utilisent des raisonnements différents pour répondre, selon la question, à deux des questionnaires, ainsi qu'un élève au document incomplet. Nous disposons donc des suivis de 28 élèves partis avec un raisonnement séquentiel et de 8 à qui il arrivait de l'emprunter en alternance avec un autre.

b – Analyse

Observons le premier raisonnement adopté après le raisonnement séquentiel :

- 11 élèves passent au raisonnement systémique, soit 11 / 28 ;
- 16 élèves utilisent un raisonnement à courant constant, soit 16 / 28 et
- 1 élève conserve son raisonnement.

Observons maintenant le raisonnement adopté avant le raisonnement systémique :

- 10 / 28 élèves utilisent un raisonnement séquentiel ;
- 17 / 28 le raisonnement à courant constant et
- un élève emploie un raisonnement séquentiel mêlé de correct.

Conclusion provisoire :

Un élève n'évolue pas : il conserve son raisonnement séquentiel.

Le raisonnement local n'apparaît pas parmi les raisonnements employés après le raisonnement séquentiel : cela tendrait à confirmer qu'il précéderait le raisonnement séquentiel. Une fois abandonné l'élève n'y revient plus.

Cet échantillon d'élèves, plus important que le précédent, confirme que le raisonnement à courant constant paraît être l'étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique. C'est également l'étape la plus fréquente après le raisonnement séquentiel.

Remarque : il arrive qu'après être passé par le raisonnement à courant constant l'élève retourne au raisonnement séquentiel. C'est le cas de trois élèves : un élève au raisonnement initial local et deux élèves au raisonnement initial séquentiel ou séquentiel mêlé de correct. Ce retour en arrière n'est qu'apparent : d'un questionnaire au suivant, le circuit possède plus de composants et se complique. L'élève se trouve face à une situation moins familière où le raisonnement séquentiel se transpose de préférence au raisonnement correct comme J.L. Closset (1983) l'a montré dans sa thèse.

Pour trois élèves passés du raisonnement à courant constant au raisonnement séquentiel, il y a 16 élèves pour effectuer le chemin inverse, partant d'un raisonnement séquentiel, ils adoptent le raisonnement à courant constant.

Sur 31 + 8 élèves au raisonnement qui peut être séquentiel selon la question, en début d'année, 28 adoptent un raisonnement systémique en fin d'apprentissage. En passant par quelles étapes :

9 / 31 élèves passent directement du raisonnement séquentiel au raisonnement systémique ;

12 / 31 passent par le raisonnement à courant constant.

Les trois élèves qui au départ avaient un raisonnement séquentiel mêlé de correct passent tous par l'étape à courant constant.

3 – Elèves partant d'un raisonnement à courant constant

Nous n'en avons pas trouvé dans la population suivie. Lorsque nous aurons passé en revue l'évolution de tous les raisonnements, nous pourrons analyser ce raisonnement comme étape d'apprentissage.

4 – Elèves partant d'un raisonnement correct

a - Observations

Ils étaient dix élèves qui utilisaient au départ un raisonnement qui paraissait correct : ils ont été quatre à le conserver tout au long de l'apprentissage. Les six autres, pour répondre à une question un peu plus difficile, ou moins familière, ont emprunté le raisonnement à courant constant avant d'adopter un raisonnement systémique.

b – Analyse

Tableau récapitulatif de l'évolution des raisonnements des élèves

X : pas d'apprentissage

Raisonnement à un stade donné :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage			
	Local	Séquentiel	A courant constant	Systémique
Local	X	1	5	1
Séquentiel	0	X	17	12
A courant constant	0	6	X	22
Correct	0	1	7	X

Ce tableau semblerait confirmer une hiérarchie des raisonnements utilisés par les élèves pour l'analyse d'un circuit électrique, partant du plus primitif :

1 - Le raisonnement local : une fois délaissé, il apparaît rare que l'élève y revienne. Partant de ce raisonnement l'élève passe le plus souvent au raisonnement à courant constant (sous réserve d'une part de notre petit effectif (7 élèves), d'autre part peut-être de nos outils d'apprentissage qui se voulaient agressifs pour le raisonnement séquentiel) .

2 - Le raisonnement suivant semblerait être le **raisonnement séquentiel** dans la mesure où l'élève ne l'abandonne, lors de l'apprentissage, qu'au profit du raisonnement à courant constant ou du raisonnement systémique, qui seraient donc plus évolués.

J.L.Closset (1983, p. 124) avait : « *constaté que le raisonnement séquentiel pouvait disparaître avec le niveau de formation, dans une situation donnée, mais se manifester à nouveau si l'on modifie la situation.* »

Nous constatons de même sa ténacité : il réapparaît en cours d'apprentissage, même après un raisonnement à courant constant ou au raisonnement correct, lorsque la situation est moins familière.

Un seul élève a conservé le raisonnement séquentiel en fin d'apprentissage.

3 - Ce raisonnement évolue majoritairement en passant par l'étape du raisonnement à courant constant. Ce raisonnement n'est pas « naturel » à l'élève qui entre en seconde, mais l'étape intermédiaire d'apprentissage la plus empruntée.

4 - Le raisonnement systémique est le plus évolué : en fin d'apprentissage il apparaît souvent mêlé au raisonnement à courant constant que l'élève utilise plus volontiers sur les montages avec dérivations, donc plus complexes. On observe également que des élèves au raisonnement initial correct passent par un raisonnement à courant constant avant de revenir à un raisonnement systémique. Ce point confirme que le raisonnement à courant constant est le plus proche du raisonnement systémique, même si le gap entre les deux est important.

Cette première analyse a une portée limitée par le nombre d'élèves suivis mais surtout en raison de l'apprentissage qu'ils ont vécu. Il aurait été intéressant de pouvoir comparer avec d'autres élèves ayant suivi un autre enseignement. Cela s'est révélé impossible, l'enseignement habituel ne consacrant pas assez de temps à l'apprentissage d'un concept pour que l'on ait accès aux étapes par lesquelles passe le raisonnement de l'élève.

Nous allons maintenant observer l'évolution du raisonnement sur une branche dérivée :

III - Evolution du raisonnement de l'élève sur la branche dérivée dont la résistance varie

1 - Observations

Etapes d'évolution du raisonnement sur la branche

Nombre d'élèves	Raisonnement initial	Raisonnement intermédiaire	Raisonnement final
6	Local	Correct	Systémique
2		Séquentiel	
15	Séquentiel	Correct	Systémique
1		Local	?
1		Courant constant	Courant constant
4		Correct	Séquentiel
3	Courant constant	Correct	Systémique
1		Correct	Séquentiel
20	Correct	Correct	Systémique
2		Séquentiel	Séquentiel
2		Séquentiel	Systémique
1		Courant constant	Courant constant

2 - Analyse

a – Evolution de chacun des raisonnements initiaux sur la branche d'un circuit mixte

Sur 8 élèves ayant employé d'abord le raisonnement local sur la branche tous arrivent au raisonnement systémique sur la branche, 6 directement et 2 en passant par le raisonnement séquentiel.

Sur 21 élèves ayant d'abord fait une analyse séquentielle sur la branche, 15 / 21 passent directement au raisonnement correct, un au raisonnement local, un au raisonnement à courant constant et quatre après un détour par le raisonnement correct reviennent au raisonnement séquentiel.

Le raisonnement à courant constant est utilisé par 4 élèves avant le raisonnement systémique, mais l'un d'eux termine avec un raisonnement séquentiel.

Ces hésitations révèlent un raisonnement correct non stabilisé et un raisonnement séquentiel auquel l'esprit revient dès que la situation est moins familière, ou que le circuit se complexifie.

Sur 25 élèves ayant abordé l'analyse de la branche avec un raisonnement correct, 20 l'ont conservé, quatre sont passés par le raisonnement séquentiel, dont deux pour retrouver un raisonnement systémique. Le dernier a préféré le raisonnement à courant constant.

Nous allons observer le nouveau raisonnement installé au détriment de celui préexistant, au niveau de la branche dérivée, lors de l'apprentissage de l'intensité :

Tableau récapitulatif de chaque raisonnement emprunté par les élèves sur la branche dérivée où R varie

X : absence d'évolution

Raisonnement à un stade donné :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage			
	Local	Séquentiel	A courant constant	Systémique
Local	X	2	0	6
Séquentiel	1	X	1	23
A courant constant	0	0	X	4
Systémique	0	9	1	X

b – Comparaison avec l'évolution des raisonnements sur la branche principale d'un circuit mixte

La hiérarchie des raisonnements sur la branche se retrouve peut-être, mais elle apparaît moins lisible dans la mesure où 41 / 59 élèves passent directement au raisonnement systémique, lorsque la prévision de la circulation sur une branche est demandée à ce stade de l'apprentissage.

Le raisonnement à courant constant sur l'ensemble du circuit est pratiquement absent. Par contre on observe sa ténacité au niveau de la branche principale, sans doute en lien avec celle de la représentation du générateur à débit constant. Cette représentation permet, sur un circuit mixte, un raisonnement correct au niveau de la branche où la valeur de la résistance varie car ce circuit est majoritairement analysé par les élèves de la façon suivante :

1 – le débit dans la branche dérivée où la valeur de la résistance varie est uniformément modifié : ils utilisent le raisonnement correct, le plus souvent limité à la branche ;

2 – le débit du générateur est maintenu constant donc le débit de la branche principale n'est pas modifié. Puis la démarche de l'élève peut être :

- soit le respect de la loi des nœuds : le débit de l'autre branche évolue de manière à maintenir le débit principal constant,
- soit aucune influence sur l'autre branche, qui conserve également son débit.

IV – Récapitulatif des observations

1 – Comparaison du raisonnement adopté par l'élève sur le circuit simple puis sur la branche dérivée

a – Comparaison du raisonnement de l'élève sur le circuit simple et sur une branche dérivée où la valeur de la résistance varie lors du questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité

Tableau comparatif du raisonnement sur le circuit simple et sur une branche dérivée, avant enseignement
(en nombre d'élèves)

Raisonnement sur : le circuit simple	Local	Séquentiel	A courant constant	Correct
la branche dérivée				
Local	6	1	1	
Séquentiel	2	18	1	1
Courant constant	2	2		
Correct	1 + (1)	9 + (1)		11

b – Analyse

Après enseignement de la circulation et avant celui de l'intensité, lors du questionnaire préalable à cet enseignement, on peut remarquer que les élèves emploient majoritairement le même raisonnement sur la branche montée en dérivation que sur le circuit simple. La répartition de ces raisonnements est :

18 / 56 séquentiel 11 / 56 systémique 6 / 56 local
soient au total 35 / 56 élèves, ou encore 62 % de la population suivie, ce qui représente une forme de cohérence.

La plus forte cohérence, avant enseignement, s'observe avec le raisonnement séquentiel pour un peu plus de la moitié des élèves cohérents (18 / 35), puis le raisonnement systémique pour environ le tiers, et enfin le raisonnement local.

2 – Comparaison du raisonnement adopté par l'élève sur le circuit principal et sur la branche dérivée dont la valeur de la résistance varie

(Observations faites lors du réinvestissement)

Tableau comparatif du raisonnement sur la branche principale et sur la branche dérivée, après un premier enseignement
(en nombre d'élèves)

Raisonnement sur : le circuit principal	Local	Séquentiel	A courant constant	Correct
la branche dérivée				
Local			1	
Séquentiel		2	2	
Courant constant			1	
Correct		5	30	14

Après un premier enseignement du concept d'intensité, on assiste à la disparition du raisonnement local. Observons, pour un circuit mixte, le raisonnement sur la branche principale comparé à celui sur la branche

dérivée : la seule cohérence rencontrée se situe au niveau du raisonnement correct, réponse fournie par 14 élèves (sans regarder l'autre branche dérivée, le raisonnement correct nécessitant d'utiliser la d.d.p.). Mais le plus grand nombre d'élèves considère une évolution sur l'ensemble de la branche dans laquelle le dipôle évolue, sans incidence sur la branche principale, et donc sur le générateur. Cette représentation se trouve chez 30 / 55 élèves, soit 55 %, pour qui cette évolution est souvent compensée par celle de l'autre branche dérivée.

On assiste donc à une diminution du taux de cohérence, à une déstabilisation qui correspond en fait à un progrès : l'apprentissage passe par une étape où l'élève emploie majoritairement un raisonnement différent sur le circuit principal et sur la branche. Toutefois la seule cohérence qui persiste est une étape de l'apprentissage du raisonnement systémique : le raisonnement est correct au niveau de ces deux branches, mais souvent la branche principale ne serait pas concernée par l'évolution...

3 – Comparaison avec des tentatives antérieures d'observation

Lors d'essais antérieurs nous avons déjà tenté un premier suivi de l'évolution du raisonnement de l'élève avec l'apprentissage dont voici les observations :

a – Suivi de l'évolution des raisonnements cohérents avant et après un premier enseignement de l'intensité

Le questionnaire préliminaire comportait deux axes de recherche :

- la représentation du circuit et de l'existence d'une circulation, mais aussi
- la représentation de cette circulation à l'aide du questionnaire de J.L.Closset (Annexe III)

Pour répondre à ce questionnaire **24 / 34 élèves** ont utilisé le même raisonnement à toutes les questions. Ces raisonnements **cohérents** se répartissaient comme suit :

2 local **19 séquentiel** 3 à courant constant
soit 19 / 24 élèves aux raisonnements cohérents avec un raisonnement séquentiel, soit près de 80 %.

Les autres élèves changeaient de raisonnement. Ils empruntaient :

- le raisonnement local mêlé à d'autres :
- 2 élèves (local + séquentiel) et 1 élève (local + séquentiel + courant constant) ;
- le raisonnement séquentiel mêlé à d'autres :
- 1 élève (séquentiel + correct) et 4 élèves (séquentiel + courant constant + correct) ;
- 2 élèves (courant constant + correct).

Ces réponses furent discutées puis mises à l'épreuve d'expériences réalisées personnellement par les élèves en T.P., complétées par un enseignement ayant pour objectif l'enseignement d'une circulation en tout point d'un circuit, sans perte de matière, abordant des aspects de l'énergie dont sa transmission à l'aide de l'analogie de la chaîne de vélo. Que sont devenus ces raisonnements ?

C'est l'un des buts du réinvestissement (Questions III, Annexe V. 8 et V. 11) sur des circuits avec deux ampoules montées en série ou en dérivation. Sur 16 élèves ayant un circuit série :

- 14 / 16 prévoient le même éclairage pour les deux ampoules. L'observation du raisonnement antérieur donne :
 - o 2 élèves cohérents à courant constant,
 - o 6 élèves cohérents avec le raisonnement séquentiel,
 - o 6 élèves incohérents, dont 1 avec courant constant + correct et 5 ayant emprunté au moins une fois le raisonnement séquentiel.
- 2 / 16 prévoient un éclairage plus fort pour la première, avec par le passé un raisonnement stable séquentiel.

Suite à ce premier enseignement on observe la **stabilité** des raisonnements à courant constant (ou correct) de 3 élèves et séquentiel de 2 élèves et une **évolution** du raisonnement séquentiel instable de 5 élèves et stable chez 6 autres, vers un raisonnement à courant constant ou correct.

Une deuxième question cherchait à comparer l'éclairage de l'ampoule A en série avec l'ampoule B avec celui de A seule dans le circuit :

- 8 pensent qu'elle éclaire pareil pour des raisons variées :

- 5 raisonnent à **courant constant** « *la pile débite toujours la même intensité* ». Ils avaient tous prévu $A = B$ avec comme raisonnement antérieur : 1 à **courant constant**, 3 **séquentiel** et 1 incohérent séquentiel ;
- 1 élève explique qu'elle est la 1^o : il avait prévu $A > B$ (raisonnement séquentiel) ;
- 2 réponses non justifiées ;
- 7 ayant prévu $A = B$ le prévoient différent mais seulement deux justifient :
 - « *elle a toute la tension* », avec raisonnement antérieur C.Ct.
 - « *elle a toute l'intensité de la pile lorsqu'elle est seule* » ancien raisonnement stable séquentiel.

Suite à ces réponses on peut préciser :

- l'évolution de 3 élèves au **raisonnement stable séquentiel** vers le raisonnement à **courant constant** et d'un élève vers le raisonnement **correct** ;
- d'un raisonnement **stable à courant constant** vers le raisonnement **correct** ;
- la stabilité d'un élève au raisonnement séquentiel et d'un élève au raisonnement à courant constant.

Pour ce réinvestissement même travail en T.P. avec rappels de la circulation, du transfert d'énergie, de l'analogie, puis introduction du concept de résistance qui propose un chemin ou constitue un frein, et de l'interaction entre le générateur et le circuit. Début de définition du concept d'intensité : force, vitesse ou débit ? C'est le débit des électrons, ce qui est constant en tout point d'un circuit série, illustré avec l'analogie de la chaîne de vélo. Cet enseignement a été suivi du questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité. Bien que ce ne soient pas les mêmes questions, qu'elles soient moins familières, on observe une **dispersion** des réponses, mais qui correspond le plus souvent à un progrès cognitif (la complexité pourrait expliquer un retour en arrière) :

- le **raisonnement local** se rencontre chez 9 élèves :
 - 5 à toutes les questions, dont 4 au raisonnement initial cohérent séquentiel et 1 incohérent local-séquentiel
 - 3 seulement sur le circuit simple qui pratiquaient ensuite un raisonnement correct sur la branche principale d'un circuit comportant une dérivation (antécédent : 1 cohérent local, 1 cohérent séquentiel, 1 incohérent local-séquentiel)
 - 1 sauf au 1 (antécédent cohérent local)
- le **raisonnement séquentiel** chez 7 élèves :
 - utilisé à toutes les questions par 4 élèves dont 3 au raisonnement stable séquentiel et 1 instable séquentiel
 - à toutes les questions sauf une partie du circuit mixte par 3 élèves, dont 2 au raisonnement antérieur instable séquentiel et un stable ;
- 9 élèves raisonnent à **courant constant** à toutes les questions. Ils utilisaient avant :
 - 5 un raisonnement stable séquentiel
 - 1 un raisonnement instable entre courant constant et correct ;
- 6 élèves ont adopté le **raisonnement correct** à toutes les questions. Leur raisonnement antérieur était stable :
 - 3 séquentiel
 - 3 à courant constant.

Tableau de l'évolution d'un raisonnement cohérent en un autre :

Cohérence initiale	Local	Séquentiel	A courant constant	Correct	Total
	2	19	3	0	24
Evolution après l'enseignement de l'intensité	2 local	5 local 3 séquentiel 5 à C.Ct. 3 correct	3 / 3 correct		
Nouvelle cohérence	7	3	6	6	22

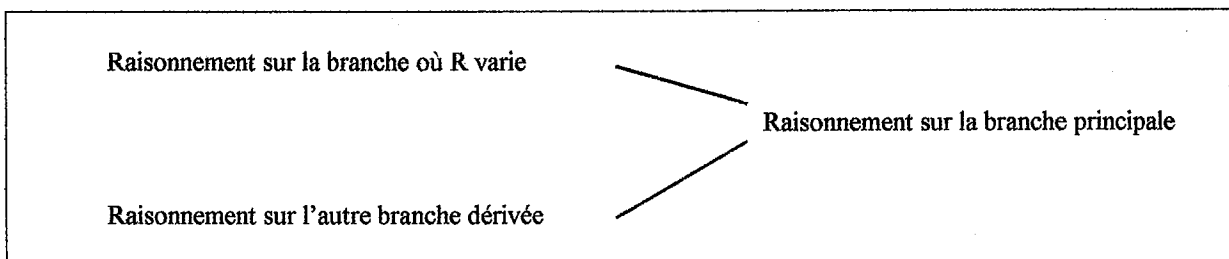
Cette observation s'arrêtait à la première étape de l'apprentissage du concept, mais permettait déjà de remarquer que le raisonnement précurseur au raisonnement correct pouvait être le raisonnement à courant constant ou séquentiel, et qu'il n'y avait pas d'évolution du raisonnement à courant constant vers un raisonnement introduisant une discontinuité du débit (local ou séquentiel). Cela irait dans le sens d'une meilleure représentation de la circulation, sens prévu par J.L.Closset (1992) qui avait émis l'hypothèse d'une hiérarchisation des différents raisonnements qu'il avait rencontrés en électricité.

Toutefois, il arrive qu'un raisonnement séquentiel évolue vers un raisonnement local à une question, celui-ci permettant une réponse « apparemment correcte » sur le circuit simple (tout en rendant compte d'une perte d'énergie au niveau de la résistance). Nous avons déjà évoqué ces retours en arrière lorsque la situation se complexifie et le nouveau raisonnement encore mal stabilisé.

Cette hypothèse est à l'origine d'autres observations :

b – Observation de l'évolution du raisonnement utilisé entre le circuit série et celui sur les différentes branches d'un circuit mixte

Nous indiquerons les raisonnements utilisés sur les différentes parties d'un circuit mixte par le symbolisme suivant :

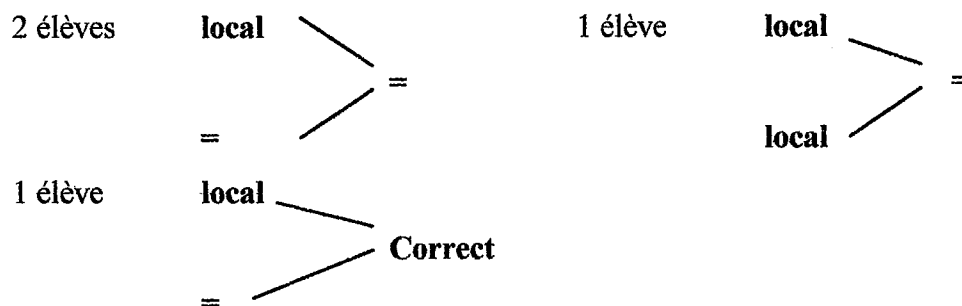


Voici les observations réalisées à la suite de l'expérimentation 1998-99 : on a étudié, après le travail du concept d'intensité sur le circuit simple et la loi des nœuds, l'évolution du raisonnement entre le circuit série et le circuit mixte.

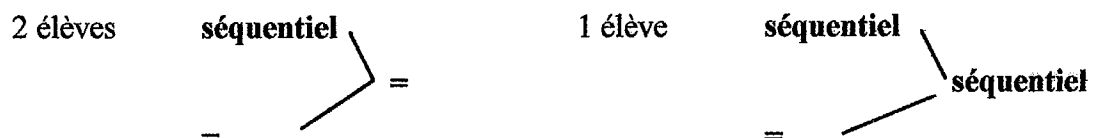
b1 – raisonnement local sur le circuit série

Il est utilisé par 26 / 68 élèves : il se retrouve sur une branche où R varie pour 4 d'entre eux, tandis qu'il se transforme pour les autres : 17 adoptent le raisonnement du physicien (noté « correct »), 2 celui à courant constant (noté =), 3 le raisonnement séquentiel. Voici les différentes représentations observées, en fonction du raisonnement adopté sur la branche qui évolue :

- conservation du raisonnement local :



- utilisation du raisonnement séquentiel :



- utilisation du raisonnement à courant constant (1):

2 élèves
(1)

$$\begin{array}{c}
 = \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

- utilisation du raisonnement correct :

8 élèves
(2)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

3 élèves
(3)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

4 élèves
(4)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

2 élèves
(5)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

b2 – raisonnement séquentiel sur le circuit série

C'était le raisonnement cohérent utilisé par 15 élèves (+1 incohérent) sur le circuit série. Il reste celui de 3 élèves sur la branche où R varie, les autres utilisant le raisonnement à courant constant (2) mais surtout le raisonnement correct (11 élèves), avec un élève au raisonnement séquentiel sur la branche principale. Voici les raisonnements représentés :

- avec utilisation du raisonnement séquentiel :

1 élève

$$\begin{array}{c}
 \text{séquentiel} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

2 élèves

$$\begin{array}{c}
 \text{séquentiel} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

1 élève

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

- utilisation du raisonnement à courant constant dans la branche où R varie :

2 élèves
(1)

$$\begin{array}{c}
 = \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

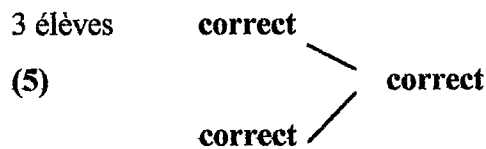
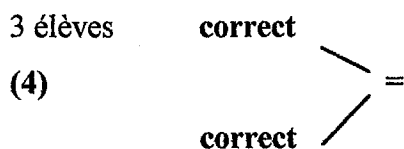
- utilisation du raisonnement correct dans la branche où R varie :

2 élèves
+ 1 (loc + seq)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$

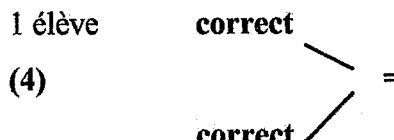
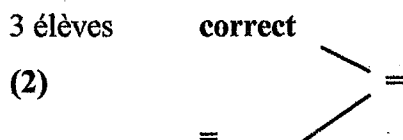
1 élève
(3)

$$\begin{array}{c}
 \text{correct} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 =
 \end{array}$$



b3 – raisonnement à courant constant sur le circuit série

7 élèves raisonnaient à courant constant sur le circuit série. Lors des prévisions sur le circuit mixte, 2 raisonnent à courant constant (schéma 1), 1 adopte le raisonnement correct (schéma 5), les 4 restant modulent leur réponses avec du raisonnement à courant constant et du raisonnement correct :



b 4 – raisonnement correct sur le circuit série

Il était utilisé par 23 élèves sur le circuit série. Il est utilisé à propos de la branche où la résistance évolue par 15 élèves, tandis qu'il se transforme :

- avec partage équitable à un nœud pour 3 élèves au raisonnement à courant constant et pour 1 au raisonnement local sur la branche évoluant ;
- avec absence de respect de la loi des nœuds, pour 2 élèves au raisonnement à courant constant et pour 2 autres au raisonnement local.

Ceux qui conservent le raisonnement correct sur la branche où R varie sont 1 à adopter le raisonnement (2), 5 le raisonnement (3), 4 le raisonnement (4) et 5 le raisonnement (5).

Analyse de ces évolutions :

L'enseignement a insisté sur la continuité du débit le long du circuit série mais aussi au niveau d'un nœud. On en attend un effet sur le raisonnement local ou séquentiel.

Tableau résumant l'évolution des raisonnements lors du passage du circuit série au circuit mixte

Raisonnement sur : le circuit série	Local 26	Séquentiel 15 + 1	A C.Constant 7	Correct 23	Total 72
les éléments du circuit mixte					
Branche où R varie	4 local 3 séquentiel 2 C.Ct. 17 correct	3 séquentiel 2 C.Ct. 10 correct	2 C.Ct. 5 correct	3 local 5 C.Ct. 15 correct	7 local 6 séquentiel 11 C.Ct. 47 correct
Branche principale	1 séquentiel 19 C.Ct. 6 correct	1 séquentiel 11 C.Ct. 4 correct	6 C.Ct. 1 correct	13 C.Ct. 10 correct	2 séquentiel 49 C.Ct. 21 correct

Le raisonnement local conservé sur la branche par 7 élèves leur permet le respect du débit de part et d'autre d'un dipôle ainsi que la loi des nœuds, mais avec partage égal.

Les raisonnements local, séquentiel, à courant constant font majoritairement place au **raisonnement correct sur la branche**, mais sans interaction avec le circuit principal, le **générateur** conservant un **débit constant**. Cette propriété peut admettre une interaction avec l'autre branche. Le raisonnement reste localisé : il limite l'effet du dipôle soit à sa branche, soit à l'ensemble des dérivations, dans les deux cas sans interaction avec le générateur.

Peu à peu l'élève semble étendre le domaine d'action d'un dipôle...

On peut remarquer que ceux qui, sur le circuit série employaient un raisonnement :

- local, choisissent pour analyser un circuit mixte, parmi toutes les formes de raisonnement ;
- séquentiel, n'utilisent plus jamais le raisonnement local, par contre, ils peuvent utiliser l'un des autres ;
- à courant constant n'utilisent jamais le raisonnement local ou séquentiel, par contre ils se servent soit de celui à courant constant, soit du raisonnement correct ;
- correct, utilisent le raisonnement correct ou celui à courant constant (à 3 exceptions près qui ont utilisé le raisonnement local sur la branche où R varie).

Cette étude contribue à valider l'hypothèse de la hiérarchie des raisonnements, émise par J.L. Closset :

- le raisonnement local, avec deux discontinuités du débit serait plus primitif ;
- le raisonnement séquentiel qui n'a plus qu'une discontinuité, représenterait un réel progrès, mais il semblerait, d'après nos observations, que cette étape ne soit pas toujours utilisée ;
- le courant constant qui ne présente plus de discontinuité, produit par démystification des raisonnements local et séquentiel, serait le plus proche du raisonnement correct, tout en restant à un niveau plus simple,
- le passage du raisonnement séquentiel au raisonnement à courant constant présenterait un gap moins important que le saut au raisonnement systémique.

A cette étape de l'apprentissage les élèves emploient majoritairement un raisonnement correct sur la branche dont la résistance varie et un raisonnement à courant constant sur la branche principale.

Ces observations fournissent une idée de la diversité des modes de représentation dans les différentes branches de ce circuit : ils constituent des stades intermédiaires dont il serait intéressant de découvrir le devenir pour affiner les étapes de l'apprentissage sur le circuit mixte.

V - Conclusions

1 – Evolutions du raisonnement observé initialement sur le circuit simple

a – Comparaison avec le raisonnement employé sur le circuit principal d'un circuit mixte

Le raisonnement sur le circuit simple se transpose et évolue, souvent par étapes :

- Partant d'un raisonnement local, 5 / 8 élèves passent par le **raisonnement à courant constant**, 2 élèves passent directement au raisonnement correct, un élève fait le détour par le raisonnement séquentiel.
- Partant d'un raisonnement séquentiel, l'évolution passe majoritairement par le **raisonnement à courant constant** (16 / 28) avant le raisonnement correct, 10 élèves passant directement au raisonnement correct dès le premier enseignement, un élève restant séquentiel.
- Partant du raisonnement à courant constant 22 / 28 élèves arrivent ensuite au raisonnement correct, alors que 6 empruntent le raisonnement séquentiel (reflet de sa ténacité ?).

b – Comparaison avec le raisonnement employé sur la branche dérivée d'un circuit mixte

Quelque soit le point de départ on observe une évolution rapide vers le raisonnement correct adopté par 48 / 58 élèves :

- Partant du raisonnement local, 6 élèves passent directement au **raisonnement correct**, tandis que 2 font un détour par le raisonnement séquentiel ;
- Partant du raisonnement séquentiel, 19 élèves passent directement au **raisonnement correct**, (dont 4 retournent au raisonnement séquentiel ensuite) ; un élève fait le détour par le raisonnement local avant le raisonnement correct, un autre passe directement au raisonnement à courant constant ;
- Partant d'un raisonnement à courant constant 4 élèves sur 4 passent ensuite au **raisonnement correct**, mais l'un d'eux en vient ensuite au raisonnement séquentiel.

c – Comparaison entre les raisonnements employés sur la branche principale et la branche dérivée d'un circuit mixte

Le raisonnement correct semble plus accessible au niveau de la branche dérivée, où l'on trouve peu de raisonnement à courant constant : il y est généralement conservé. On l'observe pour 46 élèves tandis que 9 passent ensuite au raisonnement séquentiel.

Au niveau du circuit principal, l'interaction avec ce qui se passe dans une branche est plus difficile et nécessite des étapes. Il n'y a que 1 / 8 élèves pour passer directement du raisonnement local au raisonnement systémique ; 9 / 28 élèves pour passer directement du raisonnement séquentiel au raisonnement systémique, alors que 16 / 28 font un détour par le raisonnement à courant constant. 22 / 28 élèves qui raisonnent à courant constant passent ensuite au raisonnement systémique.

2 - Conclusions et perspectives de recherche

Nous avons pu observer au sein de ces populations de Brive et de Grenoble **des évolutions comparables** des raisonnements tant au niveau du circuit principal que de la branche, ce qui tendrait à **confirmer l'hypothèse de J.L.Closset de la hiérarchie des raisonnements**, où le raisonnement local serait le plus facile à délaissier et le générateur à débit constant le véritable obstacle. Cette hypothèse pourrait décrire **des étapes de l'apprentissage** du concept d'intensité, étapes non enseignées, mais étapes par lesquelles le raisonnement qui n'évolue que par petites accommodations passe et s'attarde plus ou moins longtemps (avec d'éventuels retours en arrière, lorsque la situation proposée devient moins familière ou se complexifie) selon le gap que représente pour l'élève le passage à l'étape suivante.

Il reste une **question importante** : nos observations ne seraient-elles pas en lien avec notre enseignement ?

Les étapes par lesquelles sont passés les raisonnements des élèves dont nous avons suivi l'évolution correspondent à la fois :

- à l'évolution relevée en fonction de l'âge des élèves interrogés par J.L.Closset : davantage de raisonnement local chez les plus jeunes, puis une majorité de raisonnement séquentiel...
- à la progression observée entre l'entrée en seconde et la fin de l'année de seconde chez les élèves nous ayant servi de repères extérieurs à la séquence ;
- à une hiérarchie cognitive, un peu comme si le regard s'élargissait progressivement, partant de la prise en compte du récepteur seul (raisonnement local), puis d'une influence possible en aval (raisonnement séquentiel)... pour enfin prendre en compte l'ensemble du circuit ;
- à une diminution progressive du nombre de discontinuités du débit, dont nous avons déjà parlé...

Aussi avons toutes les raisons de penser que la concordance observée entre l'hypothèse émise par J.L.Closset et les chemins empruntés par nos élèves n'est pas une conséquence de notre enseignement. Mais pourquoi ne pas essayer de le confirmer par d'autres études ?

D'autre part, la diversité des représentations du circuit mixte peut aussi conduire à observer les évolutions des représentations, ce qui préciserait encore les chemins d'apprentissage.

B - Autres observations liées à l'expérimentation de la séquence

I - Vérification d'une base de départ voisine

1 - Etat des lieux à l'entrée en seconde à Brive

La séquence démarre par un questionnaire (Annexe II) dont le but est double :

- Il est d'abord d'établir, dans le cadre de la pédagogie de la maîtrise, la nature d'une base commune sur laquelle pourra s'appuyer le premier enseignement de la séquence (but que nous développerons lors des observations en lien avec les hypothèses);
- Il est aussi, dans la perspective d'utiliser une référence extérieure à la séquence, (et c'est ce qui nous intéresse dans cette partie), de s'assurer que la classe qui apprendra avec la séquence, est une classe dont les connaissances des élèves, à l'entrée en seconde, étaient comparables à celles d'autres élèves inscrits en seconde et qui suivront un autre enseignement. L'intérêt de ce contrôle sera de permettre d'utiliser d'autres élèves de cet établissement, comme référence extérieure après apprentissage, en fin d'année par exemple : ayant vérifié que les connaissances, au départ, étaient comparables, le seront-elles toujours après enseignement ?

Dans ce but, ce questionnaire a été distribué à la classe qui suivra la séquence, mais aussi, (par exemple lors de l'essai de l'automne 1996), à deux autres classes de seconde du même établissement, la semaine de la rentrée. Ces classes furent choisies au hasard : les élèves des deux premiers collègues volontaires rencontrés. Ce questionnaire a été établi à partir d'observations faites à l'occasion du passage d'un questionnaire en fin de classe de troisième (M.F. Missonnier ; 1996, b). Il est principalement axé sur la circulation. Nous cherchons à savoir si, pour l'élève qui entre en seconde :

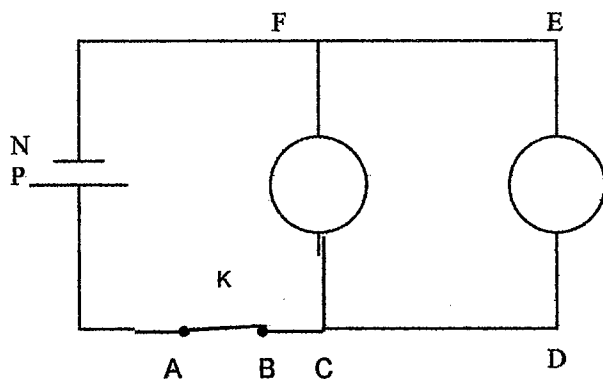
- il est nécessaire que le circuit soit une boucle fermée ?
- l'intérieur de la pile participe à la fermeture du circuit ?
- quelque chose circule en amont d'un interrupteur ouvert ?

Nous en profitons pour nous faire une idée sur : que circule-t-il ? Comment ? Pourquoi ?... Idées qui permettront à la séquence de s'inscrire dans un contexte connu, d'être en lien avec les représentations, mais aussi les questions de l'élève.

Pour établir notre comparaison entre ces deux populations, nous ne nous intéresserons aujourd'hui, pour plus de clarté dans la présentation, qu'aux réponses facilement comptabilisables.

a - Réponses recueillies à ce questionnaire

QUESTION I (Annexe II. 2 ; II. 7 : existence de 2 sujets pour éviter le copiage)



Analyse préliminaire :

Le chercheur veut vérifier si l'élève pense que dans un circuit série, ou dérivation fermé :

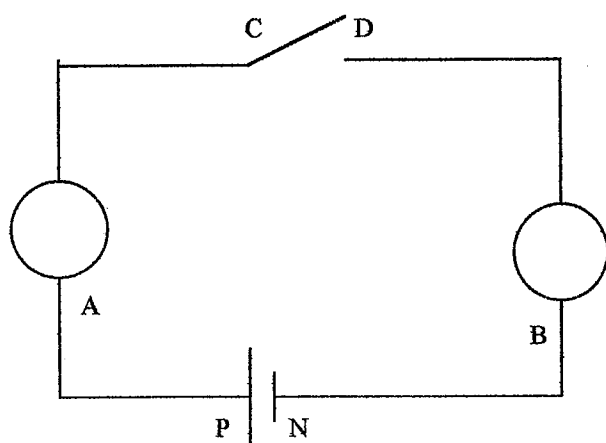
- il circule quelque chose partout ;
- y compris à l'intérieur de la pile, point connu comme délicat à ce niveau où le fonctionnement de la pile n'a pas encore été étudié, (étant au programme de 1^o S).

Tableau des réponses recueillies à la question :

Circule-t-il quelque chose à l'intérieur de la pile lorsque le circuit est fermé ?

Réponse	Elèves	Séquence 35 élèves	Autres 65 élèves	Total 100 élèves
Non		10 élèves 29 %	37 élèves 57 %	47 %
Oui		23 élèves 66 %	26 élèves 40 %	49 %

QUESTION II (Annexe II. 3 ; II. 8)



Analyse préliminaire :

L'interrupteur du circuit de la question précédente (circuit série ou dérivation, selon le sujet) est maintenant ouvert.

Nous cherchons à savoir si, comme l'imaginaient 40 % des élèves interrogés en fin de troisième, un courant circule en amont de l'interrupteur ouvert (M.F.Missonnier ; 1996, b)

Tableaux des réponses aux questions :

1 - Existe-t-il un courant en amont de l'interrupteur ouvert ?

Réponse	Elèves	Séquence 35 élèves	Autres 65 élèves	Total 100 élèves
Oui		8 élèves 24 %	21 élèves 32 %	29 %
Non		24 élèves 73 %	41 élèves 63 %	65 %
?		1 élève 3 %	3 élèves 5 %	4 %

2 – La pile est-elle traversée par quelque chose ?

Réponse	Elèves	Séquence 35 élèves	Autres 65 élèves	Total 100 élèves
Oui		3 élèves 9 %	7 élèves 11 %	10 %
Non		21 élèves 62 %	42 élèves 66 %	63 %
?		10 élèves 29 %	15 élèves 23 %	25 %

QUESTION III

Sujet A (Annexe II. 4)

Le montage est celui de la question II. Les deux ampoules montées en série, nommées A et B, sont séparées par un interrupteur ouvert : la question demande si les ampoules éclairent. Nous sommes à la recherche de traces de :

- courant antagonistes : dans cette représentation, les deux ampoules éclaireraient ;
- courant unipolaire : dans cette représentation, une seule ampoule éclairerait.

Prévisions de l'éclairement de lampes montées en série, séparées par un interrupteur ouvert :

Eclairement	Elèves Séquence 17 élèves	Autres 32 élèves	Total 49 élèves
A ou B éclaire seule	7 élèves 41 %	9 élèves 28 %	16 élèves 33 %
A et B éteintes	10 élèves 59 %	21 élèves 65 %	31 élèves 63 %
1 lampe éteinte, l'autre ???	0 0 %	2 élèves 6 %	2 élèves 4 %

Sujet B (Annexe II. 9)

Le montage est celui de la question II. Les deux ampoules identiques montées en série, nommées A et B, sont séparées par un interrupteur, à présent fermé. La question est :

- 1 - Vont-elles briller autant, ou bien y en a-t-il une qui brillera plus que l'autre ?
- 2 - A brillera-t-elle pareil que si elle était seule dans le circuit ?

Ces questions cherchent à faire préciser à l'élève :

1 - si, pour lui, la circulation se déroule à débit constant tout le long du circuit (réponse (a) raisonnement correct ou à courant constant), ou si sa vision est séquentielle ce qui le conduit à prévoir un éclairement plus faible de l'ampoule qui selon lui sera traversée la dernière (réponse b).

2 - si, intuitivement, le retrait de l'une des lampes aurait un effet sur la circulation (en vue de l'introduction ultérieure du concept de résistance), ou si, au contraire, le débit de la pile reste constant (raisonnement à courant constant ou séquentiel ; réponse c)

Eclairement comparé d'ampoules montées en série

Eclairement	Elèves Séquence 18 élèves	Autres 33 élèves	Total 51 élèves
A = B (a)	14 élèves 78 %	23 élèves 70 %	37 élèves 72 %
A ≠ B (b)	4 élèves 22 %	10 élèves 30 %	14 élèves 27 %
A = A seul (c)	8 réponses à C.Ct. 44 %	14 réponses à C.Ct. (1) 42 %	22 réponses à C.Ct. 43 %
	4 réponses séquentielles 22 %	3 réponses séquentielles (2) 9 %	7 réponses séquentielles 14 %
A ≠ A seul	6 élèves 33 %	15 élèves (3) 45 %	21 élèves 41 %

Exemples de justifications :

- (1) « Dans un circuit série l'intensité est la même partout »
- (2) « Car elle prend l'électricité qu'il lui faut »
- (3) « Car au lieu de partager l'intensité en deux, pour que les deux lampes brillent pareil, elle aura l'intensité de la deuxième lampe en plus » ;
« Elle brillera moins car il y a aussi l'ampoule B qui prend du courant, donc la lumière des deux sera moins intense » ;

« Car l'intensité de B passera alors dans A : A brillera plus » ;
 « A et B doivent se partager l'énergie, A seule recevrait toute l'énergie ».

Cette prévision, qui aurait pu paraître correcte, le plus souvent ne l'est pas après lecture de sa justification, laquelle sera précieuse dans une perspective d'enseignement : elle confirme la confusion qui s'établit, dans la tête de certains élèves, entre l'énergie et l'intensité.

QUESTION V (Annexe II. 6 ; II. 11)

Pour les deux sujets les questions étaient : 1 – Dans ce circuit un courant circule-t-il ?

2 – Si un courant circule, flécher et colorier tous les segments qu'il traverse.

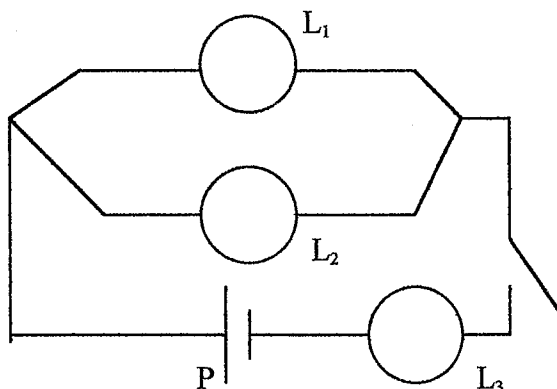
3 – On ferme l'interrupteur : ces trois ampoules brillent-elles avec la même intensité ?

Par ces questions, nous recherchions :

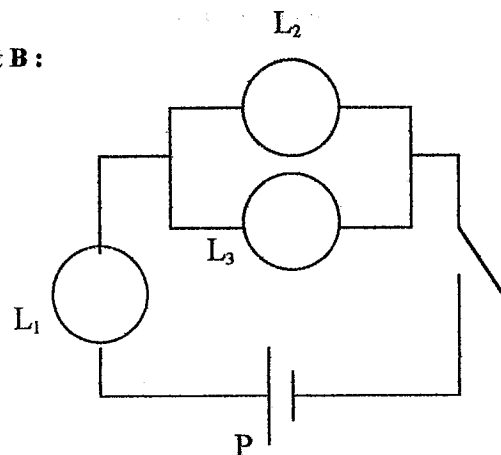
- lorsque le circuit est ouvert, la représentation d'une circulation qui tourne dans la boucle que constitue une dérivation (M.F.Missonnier ; 1996, b). Cette année là, il ne s'en n'est pas trouvé, mais cela ne fut pas toujours le cas ;

- lorsque le circuit sera fermé, les élèves qui auraient une idée, intuitive ou acquise, de la loi des nœuds, et comment ils imaginent la circulation dans le circuit :

Sujet A :



Sujet B :



Raisonnements rencontrés sur le circuit mixte

Réponse	Elèves	Séquence 35 élèves	Autres 65 élèves	Total 100 élèves
Existence d'une circulation en circuit ouvert :	Oui	5 élèves 14 %	11 élèves (a) 17 %	16 %
	Non	29 élèves 83 %	53 élèves 82 %	82 %
Circuit mixte fermé :	Viol loi des nœuds	10 élèves 29 %	4 élèves (b) 6 %	14 %
	Respect loi des nœuds	20 élèves 57 %	47 élèves 72 %	67 %
	?	5 élèves 14 %	5 élèves 8 %	10 %
La lampe de la branche principale éclaire moins que celles montées en dérivation (séquentiel)		2 élèves 6 %	3 élèves (c) 5 %	5 %
La lampe de la branche principale éclaire plus que celles montées en dérivation (correct ?)		23 élèves 66 %	45 élèves 69 %	68 %
Autre : L ₁ en série L ₃		8 élèves 23 %	?	

Exemples de justifications :

- (a) « Jusqu'à l'interrupteur ; le circuit est fermé jusqu'à l'interrupteur ».
- (b) « Elles brillent toutes les trois avec la même intensité car elles se partagent l'énergie de la pile. Chacune reçoit exactement la même intensité ».
- (c) (sujet B) « L_1 brillera moins que les deux autres puisqu'une partie du courant va être utilisée par L_2 et L_3 ». (raisonnement séquentiel)

Il est apparu une difficulté de lecture du schéma du montage mixte : certains élèves semblent habitués à classer les branchements des ampoules en deux catégories. Pour eux, elles ne peuvent qu'être montées soit en série, soit en dérivation, sans aucune autre possibilité. Aussi font-ils un usage abusif du branchement en série en l'étendant à l'une des branches de la dérivation qui serait « en série » avec la branche principale. Le branchement qu'ils identifient comme étant « en série » bénéficie alors d'un raisonnement à courant constant, ou séquentiel, ce qui aboutit à des prévisions inattendues.

b – Analyse des réponses recueillies

Les tableaux sont à lire en ayant à l'esprit qu'un élève peut représenter jusqu'à 3 % de la population, pour la séquence. Il apparaît alors que les mêmes représentations erronées se retrouvent dans des proportions voisines, à l'entrée en seconde. Ces représentations, déjà rencontrées en fin de troisième et signalées dans notre projet de recherche (M.F. Missonnier ; 1996, b), se situent principalement au niveau de :

- 1 la participation de la pile à la circulation que le circuit soit ouvert ou fermé, et donc de la **représentation de la circulation** ;
- 2 l'existence d'un courant en circuit ouvert, et donc de la **représentation du courant**, difficulté qui se retrouve avec des pourcentages voisins dans l'analyse d'un circuit série ;
- 3 la **difficulté d'analyse du schéma d'un circuit mixte** ;
- 4 du **viol de la loi des nœuds**.

Par ailleurs ces tableaux justifient, s'il en était besoin, les enseignements complémentaires prévus par la séquence, en raison de nos observations préalables à la séquence.

2 – Etat des lieux à l'entrée en seconde

Cet état des lieux, a été réalisé à la rentrée 1999, lors de l'expérimentation avec des enseignants et des élèves d'autres académies :

- dans deux classes d'une collègue de l'académie de Lille ;
- dans une classe d'une collègue de l'académie de Grenoble ;
- dans deux classes de stagiaires de l'académie de Nantes.

Nous avons utilisé les documents fournis (plus ou moins complets) pour comparer les connaissances à l'entrée en seconde, et pouvoir répondre aux questions : la séquence s'est-elle adressée à des populations dont la base de départ était voisine ? L'enseignement préliminaire du circuit et de la circulation leur était-elle également indispensable ?

Pour les élèves qui vont suivre la séquence divers documents permettent de se faire une idée de leurs représentations à l'entrée en seconde :

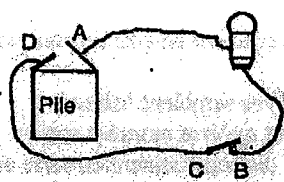
- d'une part le questionnaire préliminaire, qui place l'élève face à un simple circuit, mais lui pose des questions inhabituelles concernant la pile et le circuit ouvert ;
- d'autre part le questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité, questionnaire emprunté à J.L. Closset (Annexe pp.), qui permet une classification des raisonnements utilisés pour répondre sur le circuit simple et l'accès à leur représentation d'un nœud.

a – Questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'électricité

(Annexe V. 6-7)

Nous allons rappeler les questions I et II (du sujet A ; pour le sujet B, l'interrupteur de la question I est ouvert et celui de la question II, fermé)

QUESTION I



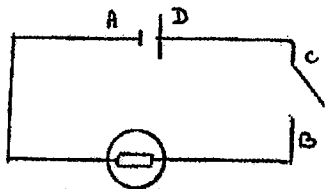
Ce schéma représente un **circuit électrique** constitué d'une **pile AD** reliée par des fils à une ampoule et un **interrupteur fermé CB**.

1 – Compléter le tableau :

Dans le tronçon :	Existe-t-il un courant électrique ?	Explique maintenant clairement pourquoi ?
AB	Oui / Non	
CD	Oui / Non	
BC	Oui / Non	
Intérieur pile	Oui / Non	

2 – Lorsqu'une ampoule est allumée, que devient le courant électrique qui arrive dans l'ampoule ?

Question II



Ce schéma représente le même circuit électrique où :

- AD représente la pile ;
- L'interrupteur CB est maintenant ouvert.

1 – Compléter le tableau :

Dans le tronçon :	Existe-t-il un courant électrique ?	Explique maintenant clairement pourquoi ?
AB	Oui / Non	
CD	Oui / Non	
BC	Oui / Non	
Intérieur pile	Oui / Non	

2 – L'ampoule éclaire-t-elle ? Oui / Non ? Pourquoi ?

3 – Lorsqu'un interrupteur est ouvert, lui arrive-t-il du courant électrique ?

- si oui, d'un seul côté ou des deux ? Que devient-il ?
- sinon, pourquoi ?

Voici le tableau récapitulatif des réponses recueillies dans les différentes académies, Nantes ne nous ayant pas fourni ce document.

Tableau des réponses au questionnaire préliminaire
(En italique, la réponse correcte)

interrupteur	Circulation	ouvert		fermé	
		oui	non	oui	Sauf pile
Lieu	Population				
Brive	35 élèves	24 / 35 dont 2 des 2 côtés 68 %	11 dont 4 sauf pile 31 %	30 dont 3 séquentiels 86 %	6 14 %
Grenoble	25 élèves	15 / 25 60 %	10 40 %	20 80 %	5 20 %
Lille	64 élèves	43 / 64 dont 3 des 2 côtés 67 %	21 33 %	53 dont 5 séquentiels 83 %	8 et 3 pile ss. réponse 13 %
Moyenne	124 élèves	82 / 124 66 %	42 34 %	103 83 %	19 15 %

Remarques

A la question concernant l'existence d'une circulation à l'intérieur d'un circuit comprenant un interrupteur ouvert, 9 élèves ont coché quatre fois « non » et l'ont expliqué par « l'interrupteur est ouvert, le courant ne passe pas. » ; puis à la question « lorsqu'un interrupteur est ouvert, lui arrive-t-il du courant électrique ? » ils répondent « oui, d'un seul côté », puis continuent éventuellement d'expliquer :

« il est alors stoppé mais je ne sais pas où il va. » ou « il repart. »

Un élève a d'abord expliqué : « oui, d'un seul côté, il est stoppé par l'interrupteur », ce qu'il a en partie rayé et laisse : « non, il est stoppé. » Ce revirement, nous a conduit à penser que l'élève avait peut-être testé une « voie sans issue » et s'était aperçu qu'il ne pouvait pas passer ? Nous avons retenu son explication finale, la plus explicite.

Conclusion

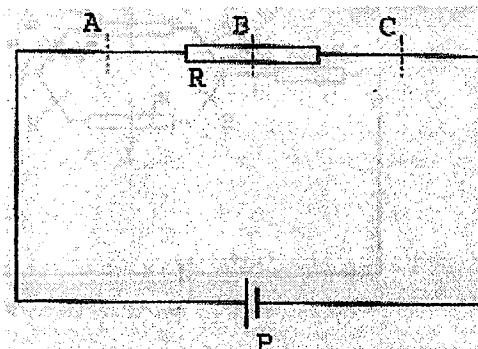
Les réponses recueillies sur cette population de 124 élèves se montrent fort proches. Nous pouvons donc considérer au niveau :

- de la participation de la pile à la fermeture du circuit et à la circulation, et d'une façon plus générale,
- des notions de circuit et de circulation

que nous partons d'une base voisine : ils ne maîtrisent ni la nécessité de fermeture de circuit pour qu'il y ait une possibilité de circulation, elle même non perçue comme un déplacement, ce qui justifie pleinement l'enseignement de ces notions considérées comme intuitives dans l'enseignement habituel, et auxquelles le pourcentage de réponses correctes ne dépasse jamais 40 % sur le circuit ouvert.

b – Questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité

Rappelons tout d'abord le schéma commun aux questions I et II :



Question I :

La première question demande de comparer l'intensité du courant en trois points, B situé à l'intérieur de la résistance, A et C de part et d'autre.

A cette question nous attendons principalement trois types de réponses, qui sont en lien avec des raisonnements identifiés par J.L.Closset(1983) :

$$A > B \quad B < C \quad A = C$$

avec une justification qui indique une action de la résistance sur l'intensité limitée à l'intérieur d'elle-même : c'est le raisonnement local ;

$$A > B \quad B = C \quad A > C$$

avec une justification de même type que la précédente pour $A > B$, puis une justification qui indique un effet de la résistance à partir du moment où le courant électrique la traverse, et dont l'effet perdure ensuite : c'est le raisonnement séquentiel ;

$$A = B = C$$

réponse correcte, obéissant à la loi de conservation de l'intensité le long d'un circuit série. Deux types de raisonnements peuvent y conduire : un raisonnement correct ou un raisonnement à courant constant. Pour lever l'ambiguïté nous allons faire évoluer la valeur de la résistance entre la question I et la question II :

Question II :

Elle étudie l'éventuelle évolution de l'intensité aux points A, B, C (mêmes points du même circuit) lorsque la valeur de la résistance augmente, ce qui permet de distinguer au niveau des réponses le raisonnement correct du raisonnement à courant constant. Aussi attendons-nous quatre types de réponses :

$$A = A \quad B \text{ varie} \quad C = C$$

l'intensité du courant ne se trouve modifiée qu'au niveau de l'élément du circuit qui a changé : c'est le raisonnement local ;

$$A = A \quad B \text{ varie} \quad C \text{ varie (diminue ou augmente)}$$

dans ce cas la modification n'affecte l'intensité du courant qu'à partir du moment où il traverse la résistance : c'est le raisonnement séquentiel ;

$$A = B = C$$

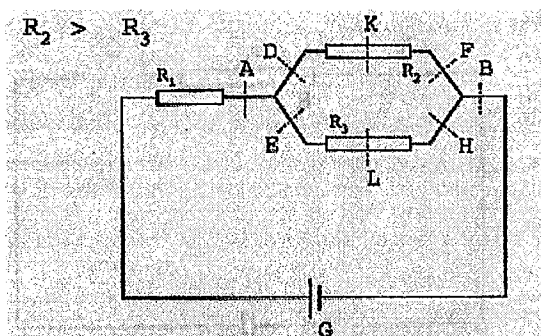
rien de changé dans ce circuit, la pile n'ayant pas changé, l'intensité du courant dans ce circuit reste la même, y compris lorsque la valeur de la résistance évolue : « la valeur de l'intensité du courant a une seule cause : la pile ». Cette réponse obéit à la loi de conservation de l'intensité du courant le long d'un circuit série, aussi est-elle compatible avec une réponse correcte à la première question : c'est le raisonnement à courant constant ;

A, B, C varient dans le même sens (diminue ou augmente), c'est le raisonnement correct.

Remarque : lorsque l'élève a prévu une évolution de la valeur de l'intensité, nous n'avons pas (pour plus de clarté dans l'analyse qui précède) précisé le sens de cette évolution : une représentation correcte de la résistance, lorsque sa valeur s'élève, conduit à prévoir une diminution de l'intensité. Des élèves prévoient une évolution en sens contraire. Rappelons que pour eux, une plus grande résistance soit a une demande énergétique plus forte (c'est pourquoi nous lui avons donné le qualificatif d'« énergétique », soit une diamètre plus gros qui laisserait passer un débit plus grand. Cette représentation se trouve mêlée aux quatre raisonnements précédents.

Question III :

Schéma



Cette question demande de comparer l'intensité du courant en D et en E, situés dans les branches dérivées, avec celle d'un point A situé dans le circuit principal ; de même celle en F et en H avec celle en B.

A cette question, nous attendons principalement deux types de réponses :

$$A > D \quad \text{et} \quad A > E$$

l'intensité du courant obéissant à la loi des nœuds, elle se partage entre les branches, ce qui est la réponse correcte, et

$$A = D \quad \text{et} \quad A = E$$

où l'intensité du courant semble être perçue comme une grandeur intensive. Ce n'est pas un flux conservé par la loi des nœuds, mais :

- soit « l'intensité se conserve en tout point du circuit quelle que soit sa géométrie »,
- soit pour d'autres intensité = vitesse, elle est la même de part et d'autre d'un nœud.

Tableau des réponses recueillies à ce questionnaire

Raisonnement Lieu Population	Local	Séquentiel	A courant constant	Correct	Loi des nœuds
Brive 35 élèves énergétique	6 / 35 17 % 5 / 6 83 %	18 51 % 8 / 18 44 %	2	9 26 % 4 / 9 44 %	Violée 8 / 33 24 % partage \neq 14 42 % partage = 11 33 %
Grenoble 25 élèves énergétique	7 / 25 28 % 7 / 7 100 %	15 60 % 6 / 15 40 %	0	3 12 % 1 / 3 33 %	Violée 15 / 21 71 % partage \neq 3 14 % partage = 3 14 %
Lille 18 élèves énergétique	9 / 18 50 % 4 / 9 44 %	9 50 % 3 / 9 33 %	0	0	8 / 16 ss.rép. et violée 3 / 16 : ignorée 11 / 16 69 % partage \neq 1 6 % partage = 4 25 %
Moyenne 78 élèves	22 / 78 28 %	42 54 %	2 3 %	12 15 %	Ignorée 40 / 78 51 %

Analyse

— Raisonnements sur le circuit simple

Pour toutes les populations, le raisonnement le plus représenté, à plus de 50 %, est le **raisonnement séquentiel**, aux multiples conséquences dont la circulation en amont d'un interrupteur ouvert. Ensuite on trouve le raisonnement local (de 17 à 50 %), puis le raisonnement correct et, pratiquement inexistant, le raisonnement à courant constant.

On peut remarquer que la population de Brive est à la fois celle qui a le plus faible taux de raisonnement local, le plus fort de raisonnement correct, la seule avec des traces de courant constant. C'est aussi la seule dont le projet d'établissement contournait la loi imposant des classes de seconde indifférenciées. Elles étaient différenciées à partir du projet de l'élève et, on est autorisé à penser, de son intérêt pour les matières scientifiques, alors que les élèves de Grenoble et de Lille formaient des classes réellement indifférenciées.

L'intensité figure dans les programmes du collège, son enseignement en seconde ne devrait constituer qu'un rappel, un approfondissement. Or, sur le circuit simple, le raisonnement correct est minoritaire, quand il n'est pas absent. Qu'en penser ?

- Le raisonnement dit « énergétique »

Nous avons nommé ainsi le raisonnement qui consiste à penser qu'une résistance plus forte, selon les élèves impose, demande, nécessite, utilise, laisse passer... une plus forte intensité. Ce raisonnement peu décrit, pouvait apparaître comme un particularisme local. Il se trouve que c'est celui de :

- | | | | |
|------------------------------|------|-------|---------------|
| - 17 / 35 élèves de Brive | soit | 49 %, | mais aussi de |
| - 14 / 25 élèves de Grenoble | soit | 56 % | et de |
| - 7 / 18 élèves de Lille | soit | 39 % | |

ce qui correspond en moyenne à **38 / 78 réponses, soit 49 %** : Brive se révèle donc dans la moyenne des populations étudiées.

On peut noter que cette représentation semble accompagner davantage le raisonnement local (de 44 à 100%, soit 72 % en moyenne) que les autres où la moyenne est autour de 40 %. La connaissance du conducteur ohmique R semble progresser avec la nature du raisonnement emprunté.

Un enseignement de ce composant semble donc justifié même s'il ne figure pas dans les programmes autrement que comme facteur de proportionnalité de la loi d'Ohm.

- La loi des nœuds

Cette loi est, en moyenne, ignorée par la moitié de la population interrogée. Elle semble mieux connue à Brive (2 sans réponse et 24 % de viol) qu'à Lille où c'est 50 % de sans réponse ou Grenoble où s'il n'y a que 4 sans réponse, ce sont 71 % des élèves qui la violent. Le rôle d'un nœud n'a donc rien d'intuitif lorsqu'on n'a pas de représentation du circuit en terme de déplacement. On peut ajouter que parmi les élèves qui en ont une idée, ils sont 18 / 36 soit 50 % à imaginer ce partage équitable ce qui les laisse libre d'utiliser un raisonnement local ou séquentiel dans la branche.

Conclusions

L'analyse des réponses à ce questionnaire a permis de noter des différences d'une population à l'autre. On peut a posteriori l'expliquer ainsi :

- le questionnaire préliminaire posait des questions sur des implicites du programme qui avaient une faible chance de se trouver enseignés, d'où l'homogénéité des connaissances au sein des populations interrogées ;
- ce nouveau questionnaire porte lui sur un concept figurant au programme du collège. Toutes les populations doivent avoir reçu un enseignement dont l'impact s'avère variable, ce qui pouvait être prévisible.

On peut toutefois y trouver des ressemblances :

- autour de 50 % de raisonnement séquentiel, et autant de raisonnement énergétique et à l'opposé
- l'inexistence du raisonnement à courant constant, ils mettent en oeuvre des modèles plus primitifs ;
- de même qu'en moyenne ils sont 50 % à ignorer la loi des nœuds.

En résumé, on a observé, avant l'enseignement de la classe de seconde, une méconnaissance du rôle de la pile, de l'interrupteur ouvert (ou du circuit ouvert), du conducteur ohmique, du débit le long d'une boucle série (raisonnement local ou séquentiel).

3 – Conclusion : ce que sait l'élève qui entre en seconde

Des questionnaires passés quatre années successives, chaque fois à une population d'une centaine d'élèves minimum, à Brive comme ailleurs en France nous permettent surtout d'établir un bilan de tout ce que l'élève qui entre en seconde ne maîtrise pas, puisqu'ils sont :

- autour de 50 % à ne pas disposer de représentation d'un circuit ni de celle du courant comme étant lié à un déplacement, d'où l'ignorance du rôle du nœud ;
- autour de 100 % à ignorer le concept de différence de potentiel ;
- autour de 50 % à percevoir le rôle d'une résistance en série comme celui d'un frein à la circulation.

Parfois, il persiste des traces de courants antagonistes, ou de modèle unipolaire qui peut être séquentiel. Toutes les autres représentations de l'intensité sont présentes, d'autant plus que sa définition est ignorée : des élèves se la représentent comme étant la force ou la vitesse du courant (d'après nos entretiens sur le nœud).

Leur représentation est fortement énergétique, énergie que des lampes en série se partagent.

Ces analyses s'étaient donné pour but de répondre à deux questions :

1 – la séquence s'est-elle adressée à des populations dont la base de départ était voisine ?

Elles montrent combien un élève qui entre en seconde à Brive est comparable à un autre élève qui arrive en seconde ailleurs en France, la base de départ est voisine ce qui autorisera certaines considérations comparatives néanmoins prudentes à propos de ces populations en cours et en fin d'apprentissage.

2 – L'enseignement préliminaire du circuit et de la circulation leur était-il également indispensable ?

Nous avons observé dans ces domaines la même absence de représentation, ce qui autorise la mise en oeuvre de l'intégralité de la séquence avec cet enseignement préliminaire.

II - Différences au niveau des acquis entre les différentes populations d'élèves ayant appris avec la séquence

En analysant les documents transmis il est apparu des différences au niveau des acquis des élèves ayant appris avec la séquence. Quelles facteurs peuvent avoir joué un rôle ?

D'une part les classes de seconde n'obéissaient pas aux mêmes critères de composition. Nous avons expliqué comment au lycée d'Arsonval à Brive il existait des secondes dites « scientifiques » alors que d'autres étaient « non scientifiques ». La situation est toute différente lorsque toutes les classes de seconde sont indifférenciées, ce qui était le cas des classes des autres académies ayant participé à la séquence...

D'autre part, l'enseignant était plus ou moins imprégné du contrat didactique et des hypothèses en jeu, selon qu'il était le chercheur, son stagiaire, ou qu'il travaillait avec pour principal support le document écrit... On peut penser que cela peut entraîner des différences au niveau de l'enseignement vécu par les élèves.

Il s'y ajoute, bien entendu, la personnalité de l'enseignant et son « expérience professionnelle », facteurs qui nous apparaissent difficiles à évaluer.

Pour ce qui est de la nature de la classe de seconde et du mode de transmission de la séquence, nous allons essayer d'évaluer leurs impacts respectifs à partir de deux sources d'informations :

- le questionnaire final, passé en Mai 1999 dans huit classes de seconde à Brive, dont quatre ayant suivi la séquence :
 - o une classe scientifique avec le chercheur ;
 - o une classe non scientifique avec le chercheur ;
 - o une classe non scientifique avec son stagiaire ;
 - o une classe scientifique avec un enseignant expérimenté ;
- le questionnaire final, passé en Mai 2000 dans huit classes de seconde de diverses académies, dont cinq ayant appris avec la séquence :
 - o une classe scientifique avec le chercheur à Brive ;
 - o une classe indifférenciée avec un enseignant de Lille
 - o une classe indifférenciée avec un enseignant de Grenoble ;
 - o deux classes indifférenciées avec des stagiaires à Nantes.

1 – Quelques observations au cours du questionnaire final de Mai 1999, à Brive

PRESENTATION générale du questionnaire :

Chaque question interroge l'élève sur l'intensité et sur la différence de potentiel. Il comportait une partie qualitative de quatre questions (présentées dans les pages suivantes ; texte intégral, Annexe VI. 5-14) :

- la question I portait sur un circuit simple ;
- la question II sur le même circuit, où la valeur de la résistance avait évolué ;
- la question III ajoutait une résistance en série, ou en dérivation au circuit précédent ;
- la question IV transformait ce circuit en un circuit mixte, par ajout d'une troisième résistance en dérivation au circuit série, ou en série au circuit avec une dérivation.

et une partie quantitative, la question V, elle même en trois parties : circuit simple, circuit série ou dérivé, circuit mixte afin de permettre une comparaison entre les prévisions qualitatives et les réponses numériques.

Aujourd'hui, nous cherchons à observer les réponses recueillies :

- selon que la classe était scientifique ou non scientifique, avec le même enseignant (le chercheur) ;
- selon que l'enseignant est ou n'est pas le chercheur, les deux classes étant dites « scientifiques »

On observera, à l'occasion ce qui se passe lorsque l'enseignant n'est pas le chercheur avec une classe non scientifique...

CONCEPT de CIRCULATION

Pour chaque question, nous allons rappeler son intitulé, les réponses attendues et fournir les prévisions recueillies. Puis nous ferons une analyse qui tentera de répondre à une éventuelle influence :

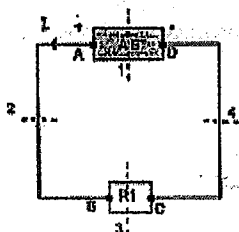
- d'une formation en didactique,
- d'une différenciation de la classe de seconde.

a - Unicité du débit sur le circuit simple

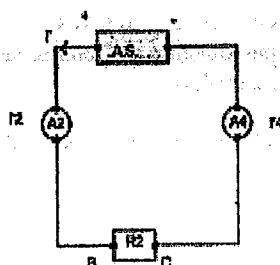
Question II (qualitative) :

Rappel de la question :

Rappel du montage de la question I



Montage de la question II



$R2 > R1$

On demande de comparer les valeurs de l'intensité du courant notées I' à ce qu'elles étaient à la question I : $I'2$ avec $I2$ et $I'4$ avec $I4$ et explique tes choix le plus clairement possible :

Réponses attendues à cette question :

Les élèves qui respectent l'unicité du débit, raisonnent soit :

- à courant constant et prévoient : $I'2 = I2$ et $I'4 = I4$
- systémique correct et prévoient : $I'2 < I2$ et $I'4 < I4$

ou le contraire, selon leur représentation de la résistance.

Tableau des élèves respectant l'unicité du débit sur le circuit simple

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Unicité du débit Acquis	29 / 33 88 %	27 / 29 93 %	20 / 32 62 %	25 / 29 86 %
Non acquis :				
Local	0	1	4	0
séquentiel	3	1	7	4
Sans réponse	1	0	1	0

Analyse :

Certaines justifications reflètent une *représentation qualitative du rôle de la résistance comme frein* à la circulation. Elles se rencontrent chez :

- 16 élèves **scientifiques du chercheur**, soient 16 / 27 réponses correctes, soit **60 %**
- 6 élèves **non scientifiques du chercheur**, soient 6 / 19 réponses correctes, soit **30 %**
- 3 élèves **non scientifiques du stagiaire**, soit 3 / 25 réponses correctes, soit **12 %**
- **0 élève scientifique autre.**

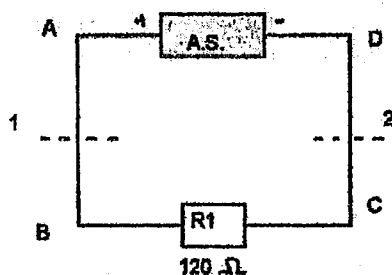
On pourrait penser, sous réserve de ce qui a été dit plus haut, au moins à titre d'hypothèse, que ces observations aient un lien avec un enseignement qualitatif qui :

- bien perçu par le chercheur a été mieux reçu par sa population scientifique,
- a été assez bien transmis à son stagiaire, dont la classe quoique indifférenciée s'en sert,
- n'a pas été suffisamment perçu par le collègue qui a bâti son cours uniquement à partir du texte de la séquence.

Cette remarque irait dans le sens des travaux de C.Hirn (1998) : pas d'évolution de l'enseignement sans formation sérieuse des enseignants.

Question V_1 (numérique) :

Rappel de la question :



Observer le circuit :

Un ampèremètre placé en 1 indique : $I_1 = 50 \text{ mA}$
 Un ampèremètre placé en 2 indiquerait : $I_2 = \dots \text{ m A}$

Tableau des réponses numériques respectant l'unicité du débit

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Unicité du débit				
Acquis $I_1 = I_2$	32 / 33 97 %	28 / 29 97 %	27 / 32 84 %	22 / 29 76 %
Pas acquis $I_1 \neq I_2$	1	0	3 9 %	0
Sans réponse	0	1	2	7 24 %

Analyse :

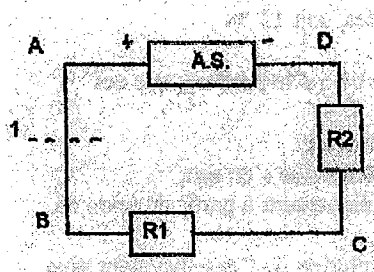
Il reste des élèves :

- pour fournir une réponse fausse qui ne peut être une erreur de calcul, mais le reflet d'une représentation séquentielle ;
- qui ne donnent pas de réponse, faute de s'être construit une représentation, tel cet élève qui affirme en entretien : « je ne sais pas faire ».

b – Unicité du débit sur le circuit série

Question V_2 (numérique) :

Rappel de la question :



Un deuxième dipôle de résistance $R_2 = 80 \Omega$ est placé en série entre C et D.

Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner les valeurs des intensités traversant tous les dipôles :

$$i_1 = \dots \text{ mA}$$

$$i_{BC} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{CD} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{AD} = \dots \text{ mA}$$

Les réponses attendues sont :

1- La réponse correcte : elle nécessite le calcul de la résistance équivalente R_e . Le raisonnement est le suivant :

Ce circuit se comporte comme un circuit simple, alimenté par le générateur précédent, relié à un seul dipôle ayant pour résistance la somme des deux autres : $R_e = R_1 + R_2$ $R_e = 120 + 80 = 200 \Omega$

Cette résistance est parcourue par un courant dont l'intensité sera plus faible, puisqu'on a rajouté un frein à la circulation, ce qui permet de prévoir : $i_1 < I_1$

Cette intensité peut se calculer à partir de la loi d'Ohm : $U_{AD} = R_e \times i_1$

$$i_1 = 6 : 200 \quad i_1 = 0,03 \text{ A} = 30 \text{ mA}$$

Comme le débit ne peut qu'être le même le long d'une boucle fermée, on peut prévoir :

$$i_1 = i_{CD} = i_{BC} = i_{AD} = 30 \text{ mA}$$

2-Le raisonnement à courant constant : il consiste à imaginer que toute modification du circuit extérieur au générateur est sans effet sur le débit, soit :

- au seul niveau du générateur : son débit resterait le même quoiqu'il arrive, puis une lecture séquentielle ou locale peut envisager un effet ultérieur. Dans tous les cas il conduit à prévoir : $i_1 = I_1 = 50 \text{ mA}$

- ou cette absence d'effet s'étend à l'ensemble du circuit, ce qui conduit à prévoir :

$$i_1 = I_1 = i_{CD} = i_{BC} = i_{AD} = 50 \text{ mA}$$

Ce raisonnement présente l'intérêt de simplifier la démarche de réponse qui se passe de toute référence à un savoir scientifique tels la loi d'Ohm ou la résistance équivalente.

3-Le raisonnement séquentiel prévoit une diminution progressive du débit lors de la traversée de chaque dipôle, partant d'un intensité i_{AD} maximale à 50 ou 30 mA, selon que le générateur est ou n'est pas considéré à débit constant, puis une diminution après chaque dipôle en fonction du sens de circulation considéré par chaque élève.

4-L'absence de construction d'un concept circulatoire a été observée dans la partie qualitative. Elle se manifestait par exemple par l'absence de circulation dans les fils, ou un partage de l'intensité entre les dipôles montés en série, le générateur conservant le même débit (utilisation en apparence d'une propriété de la d.d.p., en fait le reflet d'une absence de représentation du concept d'intensité : l'élève lui fait répondre à des préoccupations en termes d'énergie).

Remarque : qui calcule R_e et pourquoi ?

La réponse correcte nécessitait le calcul de la résistance équivalente, qui n'a été effectué que par 15 élèves, soit 22 % de ceux ayant suivi la séquence. En fait le besoin de connaître R_e apparaît dès la première partie de la question en termes de d.d.p. chez les élèves qui ne se contentent pas d'imaginer un partage égal et veulent utiliser la loi d'Ohm aux bornes des dipôles : ayant la valeur de la résistance totale du circuit, il leur faut aussi celle de l'intensité qui le traverse : le nombre d'étapes pour atteindre la réponse correcte explique que seulement 8 élèves y arrivent.

Tableau des réponses recueillies aux prévisions quantitatives sur le circuit série

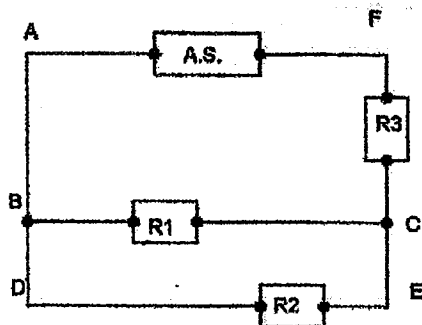
Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 16 élèves	Autre 17 élèves	Chercheur 17 élèves	Stagiaire 16 élèves
Calculant Re	9 / 16 56 %	4 / 17 24 %	1 / 17 6 %	1 / 16 6 %
Réponse correcte	6 38 %	1	1	0
Loi Intensité*	4 25 %	11 65 %	10 60 %	1
Sans réponse	3 19 %	2	3	9 56 %

Loi Intensité* : respect du débit le long de la branche : loi de l'intensité dans un circuit monté en série.

c – Dipôles montés en dérivation

Question V₂ (numérique) :

Rappel de la question :



Un deuxième dipôle de résistance $R_2 = 60 \Omega$ est placé en dérivation aux bornes de BC.

Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner les valeurs des intensités traversant tous les dipôles :

$$\begin{array}{ll} i_1 = \dots \text{ mA} & i_{BC} = \dots \text{ mA} \\ i_{DE} = \dots \text{ mA} & i_{CF} = \dots \text{ mA} \end{array}$$

Les réponses attendues sont :

1 -La réponse correcte qui nécessite l'emploi de deux outils, soit :

- Le calcul de la résistance équivalente et l'application de la loi d'Ohm. Mais dans le cas d'un circuit avec dérivation, le calcul de la résistance équivalente est plus complexe. S.Johsua (1983) explicite les difficultés que présente ce calcul pour l'élève :

- dans le meilleur des cas, il manque de rigueur tout en conduisant malgré tout à la réponse exacte,
- mais le plus souvent il conduit à un autre résultat, plus particulièrement avec l'utilisation de la relation la plus générale en $1/R$.

La réponse attendue est : $R_e = 15 \Omega$ puis la loi d'Ohm permet de connaître l'intensité traversant le générateur et les branches principales :

$$\begin{array}{lll} i_1 = U_{AF} / R_e & i_1 = 12 / 15 & i_1 = 0,8 \text{ A} \\ \text{puis celles traversant les dérivation :} & i_{BC} = U_{BC} / R_1 & i_{BC} = 12 / 20 & i_{BC} = 0,6 \text{ A} \\ & i_{DE} = U_{DE} / R_2 & i_{DE} = 12 / 60 & i_{DE} = 0,2 \text{ A} \end{array}$$

Enfin, la loi des nœuds en C, par exemple, permet de vérifier que le courant entrant et celui sortant du générateur est bien le même.

- La loi d'Ohm permet le calcul des intensités parcourant les dérivation, puis la loi des nœuds celle qui traverse la branche principale. Une approche qualitative permet de prévoir une élévation du débit du générateur par l'ajout de la dérivation, voie de circulation supplémentaire.

Quelle que soit la démarche, elle s'appuie sur la connaissance de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en dérivation, c'est à dire qu'elle nécessite une bonne maîtrise des différents concepts et de leurs propriétés. On pourra chercher à préciser les éléments de la démarche mis en oeuvre.

Au vu de la complexité de la démarche correcte, on s'attend à trouver beaucoup de :

2 -Raisonnement qui conserve constant le débit du générateur, quelque soit le circuit, alors qu'avec une branche supplémentaire il s'élève...

Ces élèves prévoient $i_1 = I_1 = 0,6 \text{ A}$. Dans ce cas, le calcul de l'intensité dans les branches, à l'aide de la loi d'Ohm aboutit à la prévision : $i_1 = i_{BC} = i_{CF}$ c'est à dire que tout se passe comme si ABCF étaient en série, comme s'il y avait une erreur de lecture du schéma, et un viol évident de la loi des nœuds.

L'autre aspect du raisonnement à débit constant consiste à **prévoir le même débit partout**, en tout point du circuit, ce qui ne met en oeuvre aucune loi, et aboutit à la prévision : $i_1 = i_{BC} = i_{DE} = i_{CF} = 0,6 \text{ A}$. Elle conduit tout autant au viol de la loi des nœuds.

3 -Le raisonnement séquentiel conduit à une évolution du débit entre la sortie et l'entrée du générateur, c'est à dire $i_{AB} \neq i_{CF}$

Tableau des outils mis en oeuvre à la question portant sur le circuit avec dérivation

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 17 élèves	Autre 14 élèves	Chercheur 15 élèves	Stagiaire 14 élèves
Outils				
Re	5	1	2	0
Re + Loi des nœuds	1 (réponse correcte)	1 (réponse correcte)	0	0
Loi des nœuds + loi d'Ohm	6 (réponse correcte)	4 (réponse correcte)	0	0
Ig = Cte + Re	3	0	1	0
Ig = Cte + Loi des nœuds	2	0	1	0
Ig = Cte + partage =	1	2	3	0
I = Constante	0	0	1	1

Tableau des principales réponses recueillies à la question portant sur le circuit avec dérivation

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 17 élèves	Autre 14 élèves	Chercheur 15 élèves	Stagiaire 14 élèves
Réponse				
Correcte	7 / 17 41 %	5 / 14 36 %	1 / 15 7 %	0
Générateur de courant constant	8 47 %	7 50 %	9 60 %	0
Sans réponse	3 18 %	1 7 %	3 20 %	13 / 14 93 %

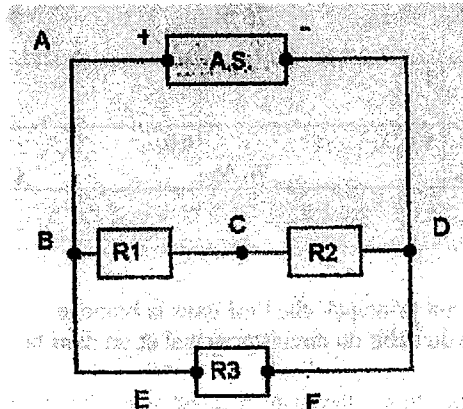
d – Réinvestissement sur le circuit mixte

Question V₃ numérique) :

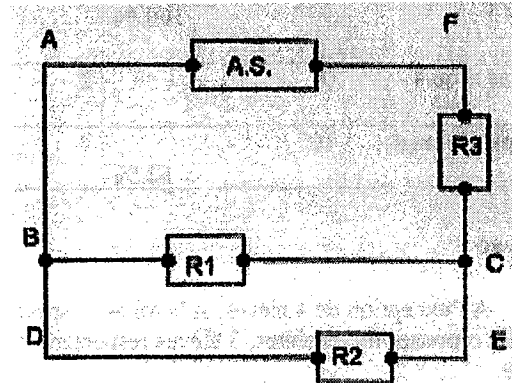
Rappel des questions des deux sujets : un troisième dipôle vient se placer

- en série avec l'alimentation, dans le cas du circuit avec dérivation
- en dérivation, aux bornes de l'ensemble du circuit monté en série.

Le montage en série devient :



Le montage en parallèle devient :



On demande de prévoir les intensités traversant les différents dipôles. Nous chercherons seulement à observer la conservation du débit sur la branche principale, ce qui est possible dans les deux sujets, ainsi que sa conservation le long de la branche dérivée, ce qui ne le sera que pour le circuit obtenu par addition d'un dipôle en dérivation d'un montage en série :

Tableau des élèves ayant conservé le débit le long de la branche principale d'un circuit mixte

Etant donné le fort taux de « sans réponse » on présente à la fois le pourcentage de réponse en fonction

- du nombre total d'élèves et
- en fonction du nombre de réponses.

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Unité du débit Acquis	10 / 33 élèves 30 %	14 / 29 48 %	6 / 32 19 %	5 / 29 17 %
	10 / 12 réponses 83 %	14 / 20 70 %	6 / 12 50 %	5 / 7 71 %
Pas acquis	2	6	6	2
Sans réponse	21 64 %	9 31 %	20 63 %	22 76 %

**Tableau des élèves ayant conservé le débit
Le long d'une branche dérivée d'un circuit mixte**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 16 élèves	Autre 17 élèves	Chercheur 17 élèves	Stagiaire 15 élèves
Unicité du débit Acquis	6 / 16 élèves 38 %	7 / 17 41 %	3 / 17 18 %	4 / 15 27 %
	6 / 6 réponses 100 %	7 / 9 78 %	3 / 4 75 %	4 / 5 80 %
Pas acquis	0	2	1	1
Sans réponse	10 62 %	7 41 %	13 76 %	10 67 %

Analyse :

A l'exception de 4 élèves, si la loi est respectée dans le circuit principal, elle l'est dans la branche. Parmi les réponses incomplètes, 3 élèves respectent la conservation du débit du circuit principal et un dans la branche.

La réponse correcte à cette question ne s'est rencontrée que chez 5 élèves de la classe scientifique du chercheur, où elle représente 5 / 33 soit 15 % des réponses de cette classe. Cette remarque paraît intéressante à souligner : l'interaction entre le générateur et le circuit demande une maîtrise de plusieurs propriétés du concept d'intensité qui ne s'est rencontrée que chez des élèves motivés par un enseignement scientifique « piloté » par un enseignant formé à la didactique.

Nous allons donc nous intéresser aux élèves qui ont éprouvé le besoin de rechercher des éléments nécessaires à la réponse et non fournis par le texte :

**Tableau des élèves ayant éprouvé le besoin de calculs intermédiaires
(éléments participant à la recherche de la réponse)**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Etape de calculs :				
Loi des nœuds	6	0	0	0
Loi d'Ohm	10	2	5	0
Lois d.d.p.	5 + 1 avec partage =	0	2	0
Résistance équivalente	6 + 1 fausse	1	0	0
Réponse correcte	5	0	0	0

Nous observons un plus grand nombre d'élèves ayant fait appel à des lois physiques et à des calculs intermédiaires dans la population du chercheur, dans sa population scientifique mais également dans sa population non scientifique : ces élèves sont plus avancés dans l'apprentissage.

e – Analyse des observations concernant le concept d'intensité

Les réponses précédentes vont permettre une étude comparative de l'acquisition de certaines propriétés du concept d'intensité. Nous allons rechercher les élèves ayant conservé le débit traversant des composants montés en série, puis les élèves ayant imaginé un débit variable du générateur, et enfin ceux dépourvus de représentation ou des outils nécessaires à la réponse.

Pour chacune des connaissances observées, nous regrouperons dans un tableau les réponses recueillies, afin d'en faciliter la lecture.

e 1 - Elèves conservant le débit de composants reliés en série :

Tableau des élèves ayant conservé le débit, selon la nature du circuit

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Débit conservé sur :	Chercheur	Autre	Chercheur	Stagiaire
Le circuit simple	88 %	93 %	62 %	76 %
Le circuit série	63 %	65 %	60 %	6 %
Le circuit parallèle	41 %	36 %	7 %	0 %
Circuit mixte : la branche principale	40 %	41 %	28 %	0 %
Circuit mixte : la branche dérivée	38 %	44 %	18 %	27 %

Ce tableau montre que cette propriété semble acquise dans des proportions voisines par les élèves des deux classes « scientifiques », quelque soit leur enseignant.

Par contre les acquis des élèves des classes non scientifiques leur sont toujours inférieurs et l'écart se creuse lorsque le circuit se complexifie. Pour ces classes, sous les réserves déjà formulées, la personne enseignante semble jouer un rôle plus important.

Nous allons compléter cette analyse par l'observation d'une autre propriété : l'adaptation du débit du générateur au circuit relié à ses bornes. Nous allons utiliser les observations des réponses recueillies à la question V_2 afin d'avoir un taux de réponse appréciable :

e 2 - Observation du débit du générateur :

**Tableau des élèves établissant
un lien entre le débit du générateur et le reste du circuit**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Le débit du générateur :	Chercheur	Autre	Chercheur	Stagiaire
Varie	13 / 33 élèves 40 %	6 / 29 21 %	2 / 32 6 %	0 / 29 0 %
Reste constant	14 42 %	20 69 %	23 72 %	6 21 %
Sans réponse	6 18 %	3 10 %	7 22 %	23 79 %

Le chercheur est, quelle que soit la nature de la classe, celui chez qui se trouvent le plus grand nombre d'élèves imaginant une interaction entre le circuit et le générateur (15 / 55 soit 27 %). L'autre classe scientifique a proportionnellement fourni davantage de réponses, mais aussi davantage de représentations d'un générateur à débit constant. La réponse majoritaire de la classe indifférenciée du chercheur est aussi à débit constant, mais

avec un taux de sans réponse plus élevé. L'autre classe indifférenciée se caractérise par un fort taux d'abstention, c'est à dire que les 4 / 5 sont dépourvus de réponse et 1 / 5 se représente un générateur à débit constant.

e3 - Evolution du nombre de « sans réponse » avec la complexification du circuit :

Tableau des élèves ne fournissant pas de réponse

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves dépourvus de réponse sur :	Chercheur	Autre	Chercheur	Stagiaire
Le circuit simple (Question V ₁)	0 %	3 %	6 %	24 %
Le circuit série (Question V ₂)	19 %	12 %	18 %	56 %
Le circuit parallèle (Question V ₂)	18 %	7 %	20 %	93 %
Circuit mixte : la branche principale	64 %	31 %	63 %	76 %
Circuit mixte : la branche dérivée	62 %	41 %	76 %	67 %

Ce tableau fait apparaître :

- des taux d'abstention voisins chez le chercheur, quelle que soit la section ;
- des taux plus élevés dans la classe indifférenciée que dans la classe scientifique ;
- une élévation du taux de sans réponse avec la complexification du circuit : de négligeable sur le circuit simple, il lui arrive de dépasser les 50 % dès qu'il y a deux composants, ce qui devient une règle quasi générale sur le circuit mixte, à l'exception de la classe de l'autre enseignant.

Rappelons qu'il recueille plus de réponses, mais comportant plus de représentations à débit constant que parmi les élèves du chercheur, représentation qui permet une réponse rapide évitant tout détour par une loi physique... (voir tableau des élèves ayant éprouvé le besoin d'effectuer des calculs intermédiaires).

Conclusions

Les élèves des deux classes scientifiques ont souvent fourni des réponses voisines, mais en observant de plus près, il se trouve des acquis dans celles du chercheur (scientifique ou non scientifique) que l'on ne retrouve pas, ou en plus faible proportion dans l'autre classe scientifique :

- la représentation qualitative du rôle de la résistance comme frein à la circulation ;
- le calcul de la résistance équivalente dans le montage en série, ou en dérivation ;
- en lien avec une plus forte représentation d'une interaction entre le générateur et le circuit, qui entraîne le besoin de plus de calculs intermédiaires.

Les élèves des classes ayant toutes deux le chercheur comme enseignant, fournissent de meilleures réponses s'ils appartiennent à la classe scientifique.

De même les réponses de la classe non scientifique du chercheur sont meilleures que celles des élèves de son stagiaire.

Le taux d'abstention est toujours supérieur chez les élèves des classes non scientifiques.

Ces observations tendraient à montrer, au moins à titre d'hypothèses :

- qu'une **formation en didactique** de l'enseignant conduirait un plus grand nombre d'élèves à une meilleure connaissance du concept d'intensité, même avec des élèves d'une **classe non scientifique**, auxquels il arrive de posséder plus d'éléments de connaissance, mais qui se révèlent plus malhabiles à en faire la synthèse qui fournirait la réponse correcte...
- que les élèves d'une **classe scientifique** seraient plus engagés dans la tâche d'apprentissage car ils sont plus nombreux à fournir une réponse, c'est à dire à s'être construit une représentation du concept d'intensité, d'autant meilleure que l'enseignant possède une formation en didactique...

Néanmoins, par la simple transmission d'un document écrit, on arrive à faire passer quelque chose dû à la force de la séquence.

CONCEPT de DIFFERENCE DE POTENTIEL

a - Connaissances qualitatives de la d.d.p. sur le circuit simple

Les questions qualitatives portant sur le concept de d.d.p. aux bornes de l'unique récepteur d'un circuit simple apparaissent à la question I qui demandait de comparer celle du générateur et celle du récepteur, puis à la question II qui demandait de la comparer à ce qu'elle était à la question précédente, alors que la valeur de la résistance a été modifiée.

Tableau des réponses à la question I

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
Correcte	26 79 %	18 62 %	15 47 %	14 48 %
Loi I U = constante	4 12 %	9 31 %	13 41 %	9 31 %
ss. explication correcte ?	3 9 %	2 7 %	4 12 %	4 14 %
ss. réponse	0	0	0	2 7 %

Tableau des réponses à la question II

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
Correcte	18 55 %	15 52 %	14 44 %	16 55 %
Fausse	13 39 %	13 45 %	16 50 %	4 + 4 ? 28 %
ss. réponse	2	1	2	5 17 %

A première vue, peu de différence sur cette question d'une classe à l'autre, mais il a été procédé à une analyse des justifications, de leur nature et des termes employés (d.d.p., tension, U, intensité ou évitant toute appellation) :

Tableau des justifications de la réponse correcte

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant	Chercheur 18 réponses	Autre 15 réponses	Chercheur 14 réponses	Stagiaire 16 réponses
Justification :				
L'ensemble du circuit	6 33 %	2 13 %	3 21 %	0 0 %
Le générateur	7	4	4	1
Montage en série	1	1	2	0
Loi d'Ohm	4	2	0	0
Affirme (R sans effet)	2	1 3	1 2	4 5
Sans justification	0	1	2	5

Tableau des justifications de réponses fausses

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant	Chercheur 13 réponses	Autre 13 réponses	Chercheur 16 réponses	Stagiaire 8 réponses
Justification :				
En terme de R	3 23 %	9 69 %	10 63 %	2 25 %
I varie, donc U varie	2	1	2	0
Loi d'Ohm	5	4	0	1
Affirme	0	0	1	1+ 4 « courant continu »
Sans justification	1	0	3	0

Analyse :

L'ensemble du circuit est beaucoup plus pris en compte chez les élèves du chercheur, ce qui leur permet de justifier 9 / 32 réponses correctes, soit 28 %, contre 2 / 15 de l'autre classe scientifique (13 %) et 0 de l'autre classe non scientifique. Exemple de justification :

« R1 est toujours alimenté par le même générateur, est toujours seule dans le circuit. Le générateur étant une alimentation stabilisée, la d.d.p. ne varie pas. »

Les autres analyses qualitatives ne prennent en compte qu'un seul élément,

- soit le générateur : *« le générateur reste identique »*
« l'alimentation est stabilisée, donc aucun changement de d.d.p. »
- soit le circuit : *« la tension ne change pas, on est toujours dans un circuit série »*

L'analyse peut être en termes de proportionnalité, basée sur la loi d'Ohm. Elle est essentiellement mise en oeuvre par les élèves des classes scientifiques, ce qui révèle un savoir issu du collège, mais aussi ses limites car si elle permet de justifier 6 réponses correctes, elle conduit 10 élèves à une prévision fautive qui peut être en lien avec une représentation d'un générateur à débit constant. Exemple d'une justification d'une prévision correcte :

« selon la loi d'Ohm $U = RI$ quand R augmente I diminue, par conséquent U ne change pas. »

On perçoit la limite de rigueur de la démarche... qui se retrouve dans la justification d'une réponse fautive :

« $U = RI$ si R augmente, alors U augmente, avec I constant »

Le lien entre I et U, ou plus exactement l'amalgame des concepts peut être simplement qualitatif :

« R2 résiste moins, donc la tension du courant qui la traverse est supérieure »

ou s'appuyer sur la loi d'Ohm :

« d'après la relation $U = RI$ on peut dire que si la résistance baisse, plus l'intensité augmente et donc U va augmenter. »

b - Les prévisions numériques sur le circuit simple (question V₁)

Pour fournir une réponse compatible avec celle de la physique, il fallait mettre en oeuvre un certain nombre de connaissances :

- la loi d'Ohm pour trouver la valeur de la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique connaissant sa résistance et l'intensité qui le traverse ;
- les lois de la d.d.p. le long d'un circuit en série,
- la valeur négligeable de la d.d.p. aux bornes d'un fil.

Il apparaît, à la lecture de ce tableau, que les deux classes du chercheur ainsi que l'autre classe scientifique ont largement mis en oeuvre des propriétés de la d.d.p. ainsi que les connaissances nécessaires pour prévoir la réponse correcte :

**Tableau donnant la nature de la réponse à la question portant sur la d.d.p.
sur le circuit simple**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
Correcte	23 70 %	21 72 %	21 66 %	10 34 %
Loi correcte avec erreur d'unité	3	6	3	1
Total propriété d.d.p.	79 %	93 %	75 %	38 %
Loi Intensité : $U = \text{constante}$	6 18 %	1 3 %	7 22 %	7 24 %
Autres réponses	0	1	1	1
Sans réponse	1	0	0	10 34 %

Par contre les élèves de la classe du stagiaire se partagent équitablement entre

- l'utilisation de lois de l'intensité (24 %),
- l'emploi de propriétés de la tension (34 %), et l'absence de réponse (34 %).

Ceci revient à dire qu'en majorité (58 %) ils ne se sont pas construits, ou ne disposent pas d'une représentation opérationnelle de ce concept, et / ou ne maîtrisent pas l'usage de la loi d'Ohm.

c – Propriétés du concept de d.d.p. le long d'un circuit série (Question V₂)

Tableau des réponses recueillies sur le circuit série

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 16 élèves	Autre 16 élèves	Chercheur 17 élèves	Stagiaire 15 élèves
Réponse				
Correcte	4 25 %	2 12 %	0 0 %	0 0 %
Loi d.d.p. $I_g = Cte$	2	8	6	
Partage égal	3		3	3
Autre réponse	1	1	3	2
total	31 %	56 %	71 %	33 %
Loi Intensité : $U = \text{Constante}$	1 6 %	2 12 %	1 6 %	1 7 %
Autres réponses	2 12 %	2 12 %	1 6 %	0
Sans réponse ou (incomplète)	(4) 25 %	(1) 6 %	2 + (1) 18 %	8 + (1) 60 %

Il apparaît que :

- la réponse correcte ne se rencontre que chez les élèves de classes scientifiques ;
- une absence de réponse pour une majorité d'élèves de la classe du stagiaire. ;
- la représentation d'un générateur à débit constant est responsable de la moitié des réponses fausses de l'autre enseignant de seconde scientifique.

d – Propriétés de la d.d.p. aux bornes d'éléments montés en dérivation

(Question V₂)

Tableau des réponses recueillies sur le montage avec dérivation

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 17 élèves	Autre 13 élèves	Chercheur 15 élèves	Stagiaire 14 élèves
Réponse				
Correcte	11 65 %	9 69 %	4 27 %	1 7 %
Loi d.d.p. $I_g = \text{constante}$	2 12 %	1 8 %	3 20 %	0
Loi Intensité : Partage au nœud	1	1	3	1
Autres réponses	0	1	2	4
Sans réponse	3 18 %	1 8 %	3 20 %	8 57 %

Les remarques précédentes sont toujours d'actualité : la réponse correcte se rencontre chez la majorité des élèves de classes scientifiques, elle est minoritaire parmi les élèves des classes non scientifiques. La majorité des élèves de la classe du stagiaire ne fournit pas de réponse.

On peut ajouter, suite à ces deux tableaux, que les propriétés de la d.d.p. aux bornes de deux récepteurs semblent mieux gérées lorsqu'ils sont montés en dérivation. Cela peut s'expliquer par la démarche à suivre pour atteindre la réponse correcte :

- en dérivation, lire le schéma avec la loi disponible dans sa tête suffit ;
- en série, le calcul de la résistance équivalente est nécessaire, sinon des hypothèses implicites, qui conduisent à des erreurs, sont mises en oeuvre, telles :
 - o considérer l'intensité comme connue, le générateur fournissant toujours le même débit ;
 - o prévoir un partage égal entre les dipôles, comme s'ils étaient identiques, situation habituelle en collège.

e – Réinvestissements des propriétés de la d.d.p. sur le circuit mixte

Nous allons commencer par rechercher quels sont les élèves qui ont fourni une réponse :

Tableau des élèves ayant fourni une réponse

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
Complète	19 58 %	20 69 %	12 38 %	5 17 %
Incomplète	3 9 %	3 10 %	6 19 %	1 3 %
Sans réponse	11 33 %	6 21 %	14 44 %	23 79 %

Environ les 2 / 3 des élèves scientifiques ont fourni une réponse complète, dans la classe non scientifique du chercheur la proportion est plus faible, mais ils sont plus nombreux à donner des éléments de réponse, c'est à dire en phase d'apprentissage. Dans l'autre classe non scientifique, près des 4 / 5 des élèves sont dépourvus de réponse.

On peut noter un plus grand nombre de réponses dans la classe scientifique de l'autre enseignant que dans celle du chercheur. Nous allons maintenant observer la nature des réponses complètes recueillies :

Tableau des réponses complètes

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 19 réponses	Autre 20 réponses	Chercheur 12 réponses	Stagiaire 5 réponses
Réponse				
Correcte	7 37 %	2 10 %	0	0
Loi d.d.p. avec partages égaux	4 21 %	0	3 25 %	3 60 %
Mélange de lois	2	5 25 %	1	1
Lois intensité	1	1	1	0
U = Constante	3 16 %	6 30 %	4 33 %	0
Autre	2	6 30 %	3 25 %	1

Si les élèves scientifiques du chercheur ont proportionnellement fourni un peu moins de réponses complètes que les autres, ce tableau montre que ces réponses sont essentiellement à base de propriétés de la d.d.p., alors qu'il n'y a que 10 % des autres élèves scientifiques à les réinvestir sur le circuit mixte. Les élèves non scientifiques ont peu répondu, mais au moins le quart d'entre eux avec une propriété de la d.d.p. valable lorsque les dipôles sont identiques, comme généralement au collège.

Nous allons observer parmi les éléments de réponse quelles sont les propriétés de la d.d.p. que chaque élève a réinvesti sur le circuit mixte :

Tableau des lois de la d.d.p. réinvesties sur le circuit mixte

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Loi d.d.p.				
$U_g = Cte$	12	8	3	3
I_g varie	36 %	28 %	9 %	10 %
$U_{fil} = 0$	20	22	17	2
$I_{fil} \neq 0$	61 %	76 %	53 %	7 %
Loi U série	16	9	7	4
	48 %	31 %	22 %	14 %
Loi U dérivation	13	11	7	4
	39 %	38 %	22 %	14 %

Le fil est 2 à 6 fois mieux connu que le générateur

f – Analyse des observations concernant le concept de différence de potentiel

Nous allons commencer par un tableau récapitulatif des élèves ayant mis en oeuvre des propriétés de la d.d.p. sur chacun des montages proposés :

Tableau récapitulatif des élèves ayant utilisé des lois de la d.d.p.

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant	Chercheur	Autre	Chercheur	Stagiaire
Circuit				
Le circuit simple (Question V ₁)	79 %	93 %	75 %	38 %
Le circuit série (Question V ₂)	56 %	69 %	71 %	33 %
Le circuit parallèle (Question V ₂)	76 %	77 %	47 %	7 %
Circuit mixte : U_g = Cte I_g varie	36 %	28 %	9 %	10 %
Circuit mixte : U_{fil} = 0 I_{fil} ≠ 0	61 %	76 %	53 %	7 %
Circuit mixte : Loi série	48 %	31 %	22 %	14 %
Circuit mixte : Loi dérivation	39 %	38 %	22 %	14 %

Les élèves des deux classes scientifiques, semblent avoir acquis des connaissances voisines, avec souvent une supériorité chez l'autre enseignant. Nous avons eu l'occasion de signaler à certaines étapes (circuit série, dérivation et mixte) que si les lois sont connues et mises en oeuvre par une proportion d'élèves proche, la réponse correcte est plus fréquente chez le chercheur. Une raison se situe au niveau de la connaissance du générateur :

Tableau des propriétés employées concernant le générateur
(Question V₃)

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
U_g = Cte I_g varie	12 36 %	8 28 %	3 9 %	3 10 %
U_g = Cte I_g = Cte	10 30 %	9 31 %	12 38 %	2 7 %
U_g varie I_g = Cte	4 12 %	12 41 %	12 38 %	8 28 %
Total I_g = Cte % élèves	42 %	72 %	75 %	34 %
% réponses	54 %	72 %	89 %	77 %
ss. réponse	7 21 %	0	5 17 %	16 55 %

Les élèves ont souvent réalisé un montage alimenté par un transformateur, alimentation stabilisée 6-12V. Ce ne sont que 26 élèves ayant suivi la séquence qui savent que cette d.d.p. reste constante alors que le

débit varie... Ce tableau montre une meilleure connaissance de ce dipôle par les élèves scientifiques du chercheur, ce qui contribue à expliquer que malgré une maîtrise légèrement moindre des lois, ils puissent fournir

- de meilleures réponses sur le montage série ou mixte,
- et des réponses fort proches sur les autres montages :

Tableau des réponses correctes aux différentes parties de la question V

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Réponse	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Question 1 Circuit simple	23 70 %	21 72 %	21 66 %	10 34 %
Question 2 Circuit série	4 / 16 25 %	2 / 16 12 %	0 / 17	0 / 15
Question 2 Circuit dérivation	11 / 17 65 %	9 / 13 69 %	4 / 15 27 %	1 / 14 7 %
Question 3 Circuit mixte	7 37 %	2 10 %	0	0

Les réponses recueillies aux questions numériques sont meilleures :

- dans les classes scientifiques que dans les classes non scientifiques ;
- sur le circuit simple et le circuit avec une dérivation, sans doute en raison de la difficulté d'accès à la réponse correcte (§ d, p. 41) dans le cas du montage en série ;
- chez le chercheur que chez l'autre enseignant en section scientifique, sur le circuit série ou mixte ;
- chez le chercheur que chez le stagiaire en section non scientifique, sur le circuit simple et le circuit dérivation.

Une autre approche de la connaissance de ce concept peut se faire en observant les élèves ne fournissant pas de réponse :

Tableau des élèves ne répondant pas aux questions

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves Sans réponse	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Question 1	1	0	0	10 34 %
Question 2 série	0 / 16	0 / 16	2 / 17 12 %	8 / 15 53 %
Question 2 dérivation	3 / 17 18 %	1 / 13	3 / 15 20 %	8 / 14 57 %
Question 3 mixte	11 33 %	6 21 %	14 44 %	23 79 %

La difficulté à répondre s'élève avec le nombre de dipôles dans le circuit dans toutes les sections, plus vite pour les élèves indifférenciés du chercheur, encore plus vite pour ceux de son stagiaire.

On peut également observer les élèves qui :

- ne distinguent pas les deux concepts : à des questions portant sur la d.d.p. ils répondent en utilisant les propriétés de l'intensité : sur le circuit série une d.d.p. constante, sur le circuit avec dérivation, la loi des nœuds ;
- utilisent tantôt l'une, tantôt l'autre de ces lois, c'est à dire qui sont encore dans une phase d'apprentissage mal assuré.

Nous allons nous intéresser aux élèves empruntant les lois de l'intensité :

**Tableau des réponses aux questions portant sur la d.d.p.,
avec les lois de l'intensité**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 33 élèves	Autre 29 élèves	Chercheur 32 élèves	Stagiaire 29 élèves
Question :				
Q1 Circuit simple $U = Cte$	6	1	7	7
Q 2 Circuit série $U = Cte$	1	2	1	1
Q 2 Circuit dérivation Loi des nœuds	1	1	3	1
Q 3 Circuit mixte Lois de l'intensité	4	6	4	0

On peut remarquer, quelle que soit la question, chez les élèves ayant fourni une réponse, le petit effectif ne différenciant pas les deux concepts. Il apparaît une confusion maximale à la première question, chez le chercheur, avec des élèves qui peuvent ensuite fournir la réponse correcte, ou les lois de la d.d.p. valables pour deux dipôles identiques, abusivement généralisée à deux dipôles différents, ou aux montages mixtes... On peut, par exemple se demander pourquoi, l'élève qui écrit en réponse à la question 1 : « la d.d.p. est la même en tout point du circuit », répond ensuite avec un générateur à débit constant à la question 2 (montage en série) et la loi d'additivité de la d.d.p. ?

Il reste des élèves sans représentation de la d.d.p. (ceux qui ne fournissent pas de réponse, en particulier dès la première question... (classe du stagiaire).

Aux autres questions, l'absence de réponse peut être un manque de familiarité avec des outils mathématiques. Ils pallient à cette lacune en considérant le générateur à débit constant, ou se forgent leur loi de la d.d.p.. Elle peut être utilisée en parallèle avec la représentation à courant constant : c'est une représentation où la d.d.p. serait constante aux bornes des différents dipôles (dont le fil peut faire partie). Nous avons été surpris par l'existence de cette représentation, non prévue qui apparaît sur le circuit mixte chez des élèves au raisonnement antérieur conforme à celui de la physique. C'est la généralisation abusive, au circuit mixte, du raisonnement appris sur le circuit simple ou sur le circuit avec dérivation. Elle a l'intérêt de dispenser du détour par toutes les lois, le calcul de la résistance équivalente... tout comme le raisonnement à courant constant.

Ce raisonnement qui considère la d.d.p. aux bornes de tous les dipôles passifs égale, est le raisonnement cohérent le plus employé sur les trois questions.

**Tableau des élèves imaginant une d.d.p. égale aux bornes des récepteurs
(réponses complètes)**

Section	Scientifique		Non scientifique	
Enseignant Elèves	Chercheur 19 réponses	Autre 20 réponses	Chercheur 12 réponses	Stagiaire 29 élèves
Réponse				
U récepteurs égales	3 16 %	6 30 %	4 33 %	0

La similitude de ce raisonnement avec celui à courant constant conduit à se demander s'il n'est pas une étape possible de l'apprentissage du concept de d.d.p. ? Il n'est apparu que chez des élèves connaissant les propriétés du concept d'intensité qui les conduisent à des prévisions correctes concernant l'intensité.

Résumé

Aux questions portant sur le concept de d.d.p., les élèves des deux classes scientifiques ont souvent fourni des réponses voisines. Mais en observant de plus près, il est apparu des acquis supplémentaires chez les

élèves du chercheur qui ont permis à un plus grand nombre d'élèves de fournir la réponse correcte au fur et à mesure que le circuit se complexifie. Exemples :

- ils sont plus nombreux à prendre en compte l'ensemble du circuit (même dans la section non scientifique du chercheur...)
- ils sont moins nombreux à raisonner avec un générateur à débit constant, ce qui permet des prévisions correctes sur le circuit série ou mixte.

La comparaison entre classes scientifiques et non scientifiques, ayant toutes deux le chercheur comme enseignant, fait ressortir de meilleures connaissances chez les élèves scientifiques : à la fois un plus grand nombre de réponses et davantage de réponses correctes.

Inversement, on note davantage de confusions avec les propriétés de l'intensité, davantage de représentations d'un générateur à débit constant et un plus grand nombre d'élèves généralisant abusivement des lois :

- apprises au collège avec des dipôles identiques, ce qui conduit à un partage égal en série (lois qu'ils appliquent au circuit mixte, ou série) ;
- apprises sur le circuit dérivation, qu'ils étendent au circuit mixte : la d.d.p. aux bornes des récepteurs est égale à celle aux bornes du générateur.

Ces généralisations abusives conduisent certains élèves à se construire une loi surprenante :

la d.d.p. aux bornes de tous les récepteurs serait la même

qu'ils soient montés en série, en dérivation ou dans un circuit mixte, et quels qu'ils soient. Cette « propriété » permet une réponse rapide, juste en dérivation quels que soient les dipôles, ou en série si les dipôles sont identiques.

Le taux d'élèves ne fournissant pas de réponse est toujours supérieur dans les classes non scientifiques, et plus particulièrement dans celle du stagiaire.

Ces observations tendraient à confirmer, en les précisant, celles portant sur le concept d'intensité :

CONCLUSION suite aux observations faites lors du questionnaire final passé à Brive, en Mai 1999

Les analyses de l'apprentissage des deux concepts (I et U) à la base de l'électrocinétique tendraient, sous les réserves formulées plus haut, au moins à titre d'hypothèses, à montrer que :

L'enseignement de la séquence à partir de son texte, sans aucune **formation de l'enseignant à la didactique**, permet à des élèves d'une classe scientifique d'acquérir, en proportion voisine d'élèves scientifiques ayant le chercheur comme enseignant, une représentation de ces concepts. Le texte * seul, ne permet toutefois pas une égale maîtrise des concepts. On a pu, par exemple, noter chez les élèves du chercheur plus de :

- représentation qualitative du rôle de la résistance comme frein à la circulation ;
- calculs de la résistance équivalente dans le montage en série, ou en dérivation ;
- en lien avec une plus forte représentation d'une interaction entre le générateur et le circuit, ce qui entraîne à prendre en compte l'ensemble du circuit pour justifier une réponse et
- le besoin de plus de calculs intermédiaires.

Les élèves d'une **classe scientifique** seraient plus engagés dans la tâche d'apprentissage car ils sont plus nombreux à fournir une réponse, c'est à dire à s'être construit une représentation des concepts, d'autant meilleure que l'enseignant possède une formation en didactique... Cette représentation est mieux différenciée, avec des propriétés connues et moins de généralisation abusive des lois simples rencontrées sur des circuits particuliers (à deux récepteurs ou avec des récepteurs identiques).

* **Remarque** : le document transmis de la séquence impose une démarche qualitative, progressive, un ordre d'introduction des concepts, le tout fondé sur des hypothèses (dont nous chercherons à mesurer l'impact dans un prochain paragraphe). Ces hypothèses, chez le chercheur sont à l'oeuvre non seulement dans la démarche, mais aussi à tout instant au cours des échanges en classe : justifications qualitatives... dont l'esprit est en lien avec une conception du contrat didactique difficile à transmettre par simple document écrit. Ces remarques font apparaître l'intérêt d'une formation en didactique des enseignants, si ce n'est sa nécessité.

Ces observations faites à Brive, se renouvelleront-elles lors de l'expérimentation ailleurs en France, avec des classes indifférenciées ?

2 – Quelques observations lors du questionnaire final, passé dans différentes académies, en Mai 2000. (Annexe VI. 15-23)

Ce questionnaire final, a été passé en Mai 2000 dans huit classes de seconde de diverses académies, dont cinq ayant appris avec la séquence : une classe scientifique avec le chercheur à Brive (académie de Limoges) ; une classe indifférenciée avec un enseignant de Lille ; une classe indifférenciée avec un enseignant de Grenoble et deux classes indifférenciées avec des stagiaires à Nantes.

Un questionnaire initial avant enseignement avait montré des ressemblances au niveau des représentations des élèves interrogés :

- autour de 50 % de raisonnement séquentiel et autant de raisonnement énergétique ;
- autour de 50 % qui imaginent l'existence d'un courant en amont d'un interrupteur ouvert ;
- l'absence de raisonnement à courant constant ;
- autour de 50 % des élèves qui ignorent la loi des nœuds ;
- une méconnaissance du rôle de la pile comme de celui du conducteur ohmique.

Cet état initial proche autorise, sous les réserves déjà faites, une comparaison des acquis. Ils ont été recherchés par le questionnaire dont nous allons parler. Nous ne nous intéresserons pas aux acquis en tant que tels (ils seront étudiés en lien avec les hypothèses) mais plutôt à déceler des états d'apprentissage différents :

- soit d'une classe à l'autre, ce qui pourrait soulever un débat au sujet de la pertinence de mettre des élèves aux acquis fort disparates dans une même classe pour apprendre : d'après P.Bourdieu, à force d'ignorer les différences, on les exaspérerait ;
- soit d'un enseignant à l'autre, ce qui pourrait soulever le problème de la transmission de la séquence et d'une formation initiale des enseignants.

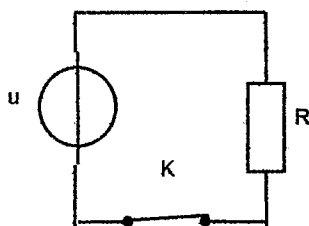
Nous allons commencer par une présentation du questionnaire : rappeler les questions et les réponses attendues (rappel : 2 versions A et B pour éviter le copiage)

2 – a – Questions en termes de d.d.p.

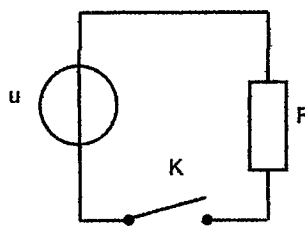
Nous allons rappeler les questions et leur réponse correcte. Les autres peuvent avoir des origines variées qui se trouvent souvent en lien avec une « propriété de l'intensité », concept dont l'élève a souvent une représentation personnelle. Lors de l'analyse, nous signalerons les réponses recueillies.

Question I du questionnaire A ou III du questionnaire B

Etat initial (1) : circuit fermé



Etat final (2) : circuit ouvert

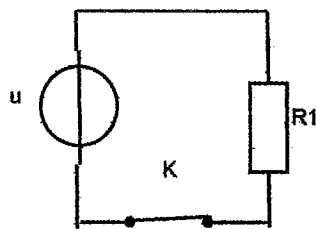


Par cette question nous cherchions à connaître l'évolution prévisible de la d.d.p. aux bornes des différents éléments d'un circuit simple lors de son ouverture :

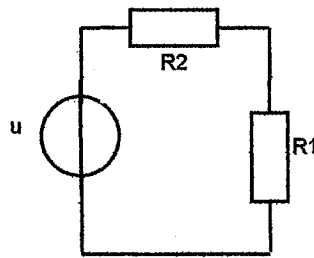
Question : Evolution de la d.d.p. aux bornes	Réponse correcte attendue
Du générateur	U_{PN} = constante (alimentation stabilisée)
De la résistance	U diminue
Du fil	U = constante ou diminue si considérée non nulle avant
De l'interrupteur	U s'élève et devient $= U_{PN}$

Question II du questionnaire A

Etat initial (1)



Etat final (3)

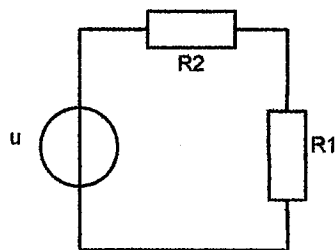


Ayant ajouté un deuxième conducteur ohmique, identique au premier, en série, conformément aux schémas, on demande de prévoir l'évolution de la d.d.p. :

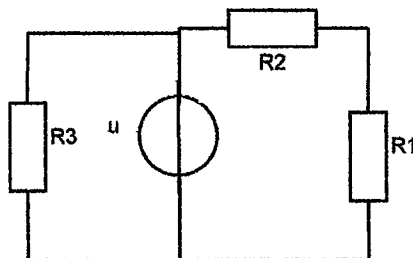
Question : Evolution de la d.d.p. aux bornes	Réponse correcte attendue
Du générateur	U_{PN} = constante (alimentation stabilisée)
De la résistance R_1	U diminue : en série, deux résistances identiques se partagent celle du générateur
Du fil, au milieu duquel a été introduite la nouvelle résistance R_2	U s'élève, c'est maintenant la d.d.p. aux bornes d'une résistance
De l'interrupteur, remplacé par un fil	U aux bornes d'un interrupteur fermé ou d'un fil est négligeable.

Question III du questionnaire A

Etat final (3)



Etat final (4)



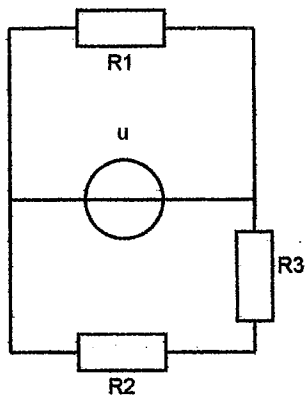
Ayant ajouté une troisième résistance aux bornes de l'alimentation on demande de prévoir l'évolution de la d.d.p. :

Question : Evolution de la d.d.p. aux bornes	Réponse correcte attendue
Du générateur	U_{PN} = constante (alimentation stabilisée)
De l'une des résistances R_1 ou R_2	$U_R = Cte = U_{PN} / 2$

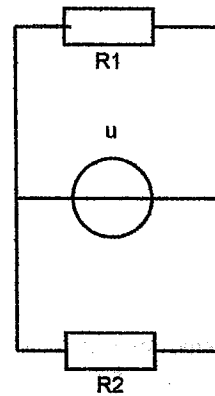
Question I du questionnaire B

Le circuit évolue de façon symétrique : on part du montage mixte précédent qui se trouve être l'état initial (1), auquel on retire l'une des résistance initialement montée en série avec une autre. Le montage devient un montage en dérivation, conformément aux schémas :

Etat initial (1)



Etat final (2)



On demande de prévoir l'évolution de la d.d.p. :

Question : Evolution de la d.d.p. aux bornes	Réponse correcte attendue
Du générateur	$U_{PN} = \text{constante}$ (alimentation stabilisée)
De la résistance reliée au générateur	$U_{R1} = U_{PN} = \text{constante}$
Du fil mis à la place de la résistance retirée	Avant $U_{R3} = U_{PN} / 2$, maintenant la d.d.p. aux bornes d'un fil étant négligeable, la d.d.p. va diminuer
De la résistance qui se retrouve seule sur sa branche	Maintenant $U_{R2} = U_{PN}$ alors qu'avant $U_{R2} = U_{PN} / 2$: la d.d.p. va augmenter

On demandait ensuite d'écrire les relations existantes entre les d.d.p. aux bornes des composants du circuit mixte :

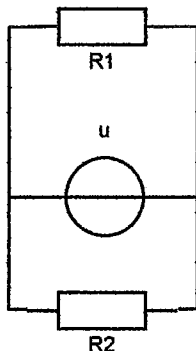
$$U_{R1} = U_{PN} = U_{R2} + U_{R3}$$

et comme les résistances sont identiques : $U_{R2} = U_{R3} = U_{PN} / 2 = U_{R1} / 2$

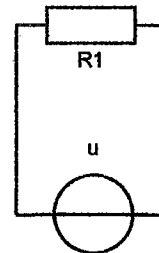
Question II du questionnaire B

Par retrait d'une nouvelle résistance, le circuit en dérivation précédent se transforme en circuit simple :

Etat initial (2)



Etat final (3)



On demande de prévoir l'évolution de la d.d.p. :

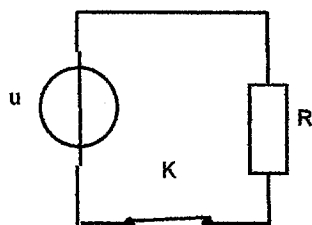
Question : Evolution de la d.d.p. aux bornes	Réponse correcte attendue
Du générateur	$U_{PN} = \text{constante}$ (alimentation stabilisée)
De la résistance restante	$U_{R1} = Cte = U_{PN}$

2 – b – Questions en termes d'intensité

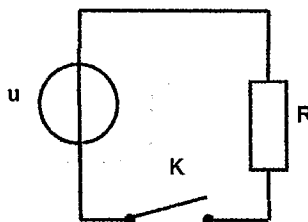
Question I du questionnaire A ou question III du questionnaire B

Elles portent toutes deux sur un circuit simple dont on ouvre l'interrupteur :

Etat initial (1) : circuit fermé



Etat final (2) : circuit ouvert



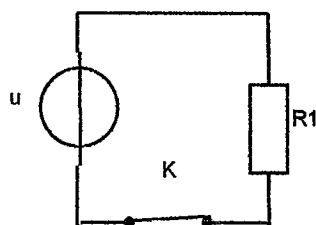
On demande de prévoir l'intensité qui traverse les différents composants du circuit (générateur, fils et résistance) après son ouverture. Les réponses attendues sont :

- la réponse correcte : l'absence de circulation, donc $I = 0$ partout ;
- la réponse en lien avec un raisonnement séquentiel qui prévoit du courant d'un seul côté de l'interrupteur ouvert ;
- la réponse des élèves qui raisonnent à courant constant et n'envisagent aucune modification de l'intensité : ils prévoient $I = \text{constante}$;
- la réponse des élèves dont le générateur est à débit constant : seule I_{PN} reste constante, les autres pouvant être nulles.

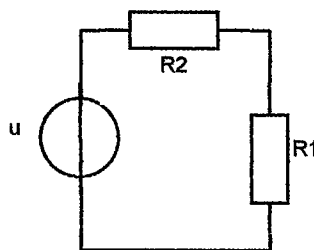
Question II du questionnaire A

On ajoute un deuxième conducteur ohmique identique au premier, en série, comme l'indiquent les schémas :

Etat initial (1)



Etat final (3)



On demande de prévoir l'éventuelle évolution de l'intensité qui traverse les différents composants. On attend :

- la réponse correcte qui, en présence d'un frein supplémentaire prévoit une diminution du débit partout ;
- une réponse également systémique, mais venant d'une vision « énergétique » de la résistance et qui conduit à prévoir une élévation du débit partout ;
- les réponses venant d'un raisonnement séquentiel (énergétique ou non) qui prévoient une modification du débit uniquement après la deuxième résistance : les réponses sont variées, selon le sens de circulation et si la résistance freine ou demande plus d'énergie...

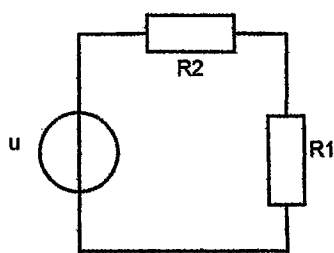
Remarque : le raisonnement local conduirait à prévoir une modification seulement au niveau du conducteur résistant, mais il ne peut pas être décelé, ce tronçon ne figurant pas dans les questions.

- le raisonnement à courant constant conduit à n'envisager aucune modification du débit, quoiqu'il arrive au circuit, $I = \text{constante}$.

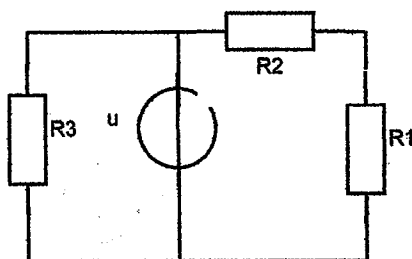
Question III du questionnaire A

On ajoute une dérivation aux bornes du générateur :

Etat final (3)



Etat final (4)



On demande de prévoir l'évolution de l'intensité qui traverse :

le générateur :

- le physicien prévoit son élévation car on a ajouté un chemin ;
- certains élèves prévoient sa diminution car on a ajouté une résistance ;
- d'autres considèrent le débit du générateur constant, que leur raisonnement soit ensuite local, séquentiel ou à courant constant ;

la résistance R_2 :

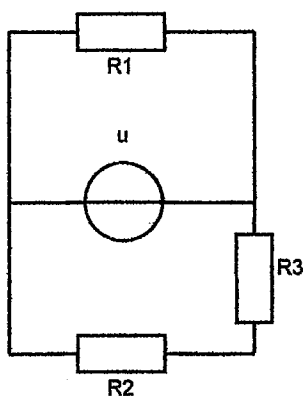
- le physicien observe que la d.d.p. reste la même aux bornes de ce dipôle, donc l'intensité restera la même ;
- mais les élèves qui raisonnent avec un générateur à débit constant et la loi des nœuds prévoient une diminution du débit qui traversera la branche $R_1 R_2$;

et de rechercher, si dans l'état 1, ou 3, ou 4 l'intensité qui traversait R_1 était la même que celle qui traversera R_3 . Pour répondre, il faut trouver un montage où la d.d.p. aux bornes de ces deux résistances serait la même : c'est celui de l'état initial : le circuit simple.

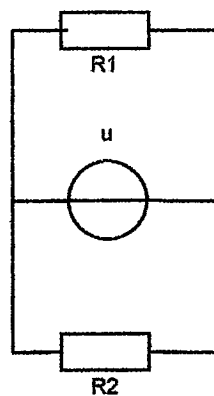
Question I du questionnaire B

Un montage mixte se transforme en un montage avec dérivation par retrait de l'une des résistances en série dans une branche :

Etat initial (1)



Etat final (2)



On demande de prévoir l'évolution de l'intensité traversant les différents dipôles.

Le raisonnement correct conduit à prévoir :

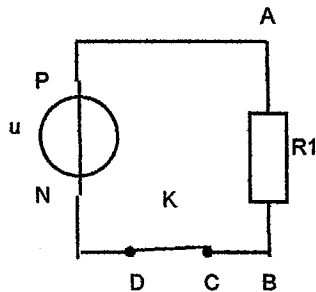
- pour R_1 : même dipôle, même d.d.p. donc même intensité ;
- pour R_2 présence d'un frein en moins dans sa branche, et / ou une d.d.p. qui augmente : dans tous les cas une intensité qui s'élève ;
- et donc le débit du générateur augmente.

Comme autre réponse, on peut penser aux élèves qui se passent de la d.d.p., et raisonnent avec un générateur à débit constant : s'ils ne raisonnent pas à courant constant, l'intensité qui traverse R_2 varie (diminue ou augmente selon l'élève) et donc l'intensité traversant R_1 évoluera en sens contraire pour vérifier la loi des nœuds.

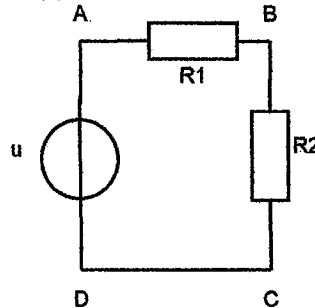
2 – c – Prévisions numériques : question IV des deux questionnaires

Questionnaire A

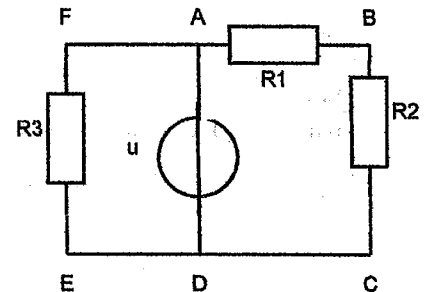
Etat (1)



Etat (3)



Etat (4)



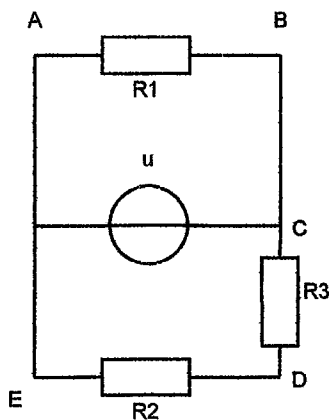
On demande de calculer les valeurs prises par la d.d.p. aux bornes des dipôles et par l'intensité qui les traverse, dans les différents circuits, lorsque le générateur utilisé possède une force électromotrice $E = 6,6 \text{ V}$ et les conducteurs ohmiques une résistance $R = 33 \Omega$.

Tableau des réponses correctes attendues

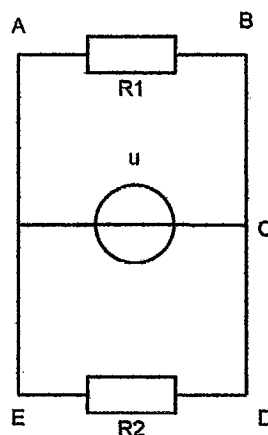
	Etat 1	Etat 3	Etat 4
U_{pn}	$U_{pn} = E = 6,6 \text{ V}$	$6,6 \text{ V}$	$6,6 \text{ V}$
$U_{cd} \text{ (fil)}$	$\approx 0 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V}$
U_{ab}	$U_{ab} = U_{pn} = 6,6 \text{ V}$	$U_{ab} = U_{pn} / 2 = 3,3 \text{ V}$	$3,3 \text{ V}$
U_{bc}	$\approx 0 \text{ V}$	$U_{ab} = U_{bc} = 3,3 \text{ V}$	$3,3 \text{ V}$
U_{fe}	X	X	$U_{fe} = U_{pn} = 6,6 \text{ V}$
I_{pn}	$I_{pn} = I_{ab} = U_{ab} / R_{ab} = 6,6 / 33 = 0,2 \text{ A}$	$I_{pn} = U_{pn} / R_e = 6,6 / 66 = 0,1 \text{ A}$	$I_{pn} = I_{ab} + I_{fe} = 0,3 \text{ A}$
I_{ab}	$0,2 \text{ A}$	$0,1 \text{ A}$	$0,1 \text{ A}$
I_{cd}	$0,2 \text{ A}$	$0,1 \text{ A}$	$0,1 \text{ A}$
I_{de}	X	X	$0,2 \text{ A}$

Questionnaire B

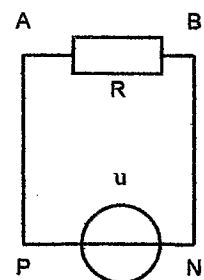
Etat (1)



Etat (2)



Etat (3)



On demande de calculer les valeurs prises par la d.d.p. aux bornes des dipôles et par l'intensité qui les traverse, dans les différents circuits, lorsque le générateur utilisé possède une force électromotrice $E = 6 \text{ V}$ et les conducteurs ohmiques une résistance $R = 100 \Omega$.

Tableau des réponses correctes

	Etat 1	Etat 3	Etat 4
Upn	$U_{pn} = E = 6 \text{ V}$	6 V	6 V
Uab	$U_{ab} = U_{pn} = 6 \text{ V}$	6 V	6 V
Ucd	$U_{cd} = U_{pn} / 2 = 3 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V (fil)}$	X
Ued	$U_{ed} = U_{cd} = 3 \text{ V}$	$U_{ed} = U_{pn} = 6 \text{ V}$	X
Ubc (fil)	$\approx 0 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V}$
Ipn	$I_{pn} = I_{cd} + I_{ab} = 30 + 60 = 90 \text{ mA}$	$I_{pn} = I_{ab} + I_{de} = 60 + 60 = 120 \text{ mA}$	$I_{pn} = I_{ab} = U_{ab} / R_{ab} = 6 / 100 = 0,06 \text{ A}$
Iab	60 mA	60 mA	60 mA
Icd	$I_{cd} = I_{de} = U_{pn} / R_e = 6 / 200 = 30 \text{ mA}$	$I_{cd} = I_{ab} = 60 \text{ mA}$	X
Ide	30 mA	60 mA	X

2 – d – Réponses correctes recueillies concernant le concept de d.d.p.

2 – d – 1 – Tableau des élèves ayant donné des éléments corrects de réponse aux questions qualitatives (élèves de différentes académies, Mai 2000)

Académie	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 56 élèves
Effectif d.d.p. correcte aux bornes du :				
Générateur $U_{pn} = Cte$	26 / 34 76 %	14 / 28 50 %	11 / 28 40 %	40 / 56 71 %
Fil $U_{fil} = 0$	31 91 %	17 61 %	10 36 %	48 86 %
Lois série et // correctes	24 71 %	14 50 %	10 36 %	21 38 %
Loi série ou loi // correcte (série + //)	(1+1) 6 %	(2+0) 7 %	(2+1) 11 %	(3+9) 21 %

Analyse

Voici quelques hypothèses concernant l'origine d'explications inattendues fournies par des élèves.

Certains :

- raisonnent à partir d'une seule notion en terme de courant, ce qui les conduit soit aux mêmes prévisions pour les questions portant sur l'intensité que pour celles sur la d.d.p. (la d.d.p. aux bornes du fil et du générateur varient par exemple), soit à un échange de propriétés, ces deux concepts restant dépourvus de représentation ;
- généralisent l'une des propriétés de la d.d.p. à l'ensemble des dipôles récepteurs, quelque soit leur montage, ou faute d'une lecture correcte de celui-ci, ce qui est à l'origine des 2 « lois » pour lesquelles il a fallu créer des colonnes : $U = Cte$ et $U_{pn} = \sum U_r$
A elles deux, ces « lois » représentent $26 / 146 = 18 \%$ des réponses fournies par les élèves ayant suivi la séquence.
- raisonnent en termes d'énergie, ce qui peut les conduire à prévoir qu'un dipôle supplémentaire en série nécessite un surplus d'énergie, et sur le circuit mixte un partage égal entre tous les récepteurs.

Les réponses correctes à propos du générateur et du fil sont dans des proportions voisines à Brive et à Nantes. C'est là que les élèves qui prévoient $U_{pn} = \text{constante}$ et $U_{fil} = 0$ sont les plus nombreux. Nous avons à l'esprit qu'il existe des élèves pour lesquels $I_g = \text{constante}$ et $I_{fil} = 0$ et qu'il reste des élèves pour fournir la même prévision, que la question soit en terme de d.d.p. ou en terme d'intensité, c'est à dire qui continuent à raisonner avec une notion unique.

Ces résultats seront éventuellement à réexaminer en tenant compte des réponses aux questions concernant le débit du générateur et celui traversant un fil.

Pour ce qui concerne la mise en oeuvre des propriétés de la d.d.p., pour des composants montés en série comme pour ceux montés en dérivation, les réponses de Brive sont meilleures. Celles des trois autres académies apparaissent assez proches entre elles. Toutefois on remarque que les élèves de Nantes qui sont les moins nombreux à utiliser les deux lois sont aussi les plus nombreux à en utiliser des éléments (soit en série, soit en parallèle) : il y a là beaucoup plus d'élèves en cours d'apprentissage.

Ces observations sont à relier :

- à l'état initial : les réponses au questionnaire préliminaire de Brive étaient meilleures que celles les deux autres académies (rappelons que les élèves de Brive se trouvent dans une classe constituée d'élèves ayant un projet scientifique) et Nantes n'a pas fourni les réponses au questionnaire initial ;
- à la formation des maîtres : à Brive c'est le chercheur formé à la didactique, à Nantes des stagiaires sensibilisés à l'IUFM, et les autres académies des enseignants expérimentés, intéressés par d'autres démarches, mais dépourvus de formation en didactique.

Une classe « scientifique », un maître formé à la didactique comme explications à une meilleure maîtrise du concept par les élèves sont des hypothèses qui seront à garder en mémoire lors de la lecture des réponses à la suite de ce questionnaire.

2 - d - 2 - Tableau des élèves aux réponses numériques correctes

Académie Effectif d.d.p. correcte aux bornes du :	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 51 élèves
Générateur $U_{pn} = Cte$	34 / 34 100 %	21 / 28 75 %	21 / 28 75 %	46 / 51 90 %
Fil $U_{fil} = 0$	31 91 %	18 64 %	12 43 %	42 82 %
Loi série	27 79 %	15 54 %	11 39 %	40 78 %
Loi dérivation	24 71 %	14 50 %	12 43 %	26 51 %
Tout correct	19 56 %	10 36 %	7 25 %	24 47 %
Tout sans réponse	0 0 %	6 21 %	7 25 %	3 6 %

Analyse

Les tableaux précédents sembleraient mettre en évidence que la d.d.p. aux bornes du générateur soit la propriété la mieux connue, par 50 à 100 % des élèves interrogés. Ce résultat n'est sans doute pas à considérer isolément, mais à pondérer en tenant compte des élèves qui raisonnent avec un générateur également à débit constant...

Ensuite vient le fil : là il apparaît des réponses qui correspondent aux propriétés de l'intensité, à relier aux réponses sur l'intensité en termes de d.d.p. ...

Les questions portant sur des dipôles associés conduisent une même population à un nombre voisin de réponses correctes quelque soit le montage : tout se passe comme si :

- soit l'élève est en mesure d'écrire les relations et de les respecter,
- soit il ne l'est pas. Par exemple, en dérivation des élèves ont écrit la loi des nœuds, ou d'une façon plus générale appliqué des lois de l'intensité à des questions portant sur la d.d.p..

On observe également des réponses au premier abord surprenantes, qui ont pu être mises en relation avec des réponses à des questions qualitatives demandant des réponses littérales : quelque soit le circuit, des élèves ont utilisé soit :

- $U = Cte$. Si cette relation ne s'applique qu'aux dipôles et se trouve associée à $U_{fil} = 0$ elle leur permet une prévision correcte sur le circuit simple et sur le circuit comportant des dérivations reliées aux bornes du générateur ; mais si elle est aussi utilisée aux bornes du fil, c'est la loi de l'intensité sur le circuit simple qui ne conduit qu'à des prévisions fausses à toutes les questions ;
- $U = U_{pn} / n$. Si cette relation est associée à $U_{fil} = 0$ elle permet à l'élève de fournir une réponse correcte aux questions portant sur le circuit simple et celui avec des dipôles identiques en série.

Il faut ajouter que les exercices habituels ne posant pas plus de questions sur les fils que sur les circuits ouverts, ces relations que les élèves se sont forgées leur permettent de fournir la réponse correcte aux questions habituelles portant sur le circuit simple et selon le cas sur le circuit en série ou sur celui avec dérivations.

Ces deux réponses semblent provenir de la généralisation d'une propriété valable dans un domaine précis, à l'ensemble des montages :

- la première est la propriété des dipôles montés en dérivation
- la seconde des dipôles, identiques, montés en série.

En conclusion, il semblerait qu'ils connaissent mieux le générateur que le fil, mieux le circuit série que le circuit avec dérivations. Les meilleures réponses sont à Brive, puis Nantes, puis Grenoble. Les réponses de Lille sont à considérer en se souvenant que le questionnaire a été passé après les conseils de classe et les bulletins. Elles sont le reflet d'élèves qui se considèrent en vacances : 25 % de sans réponse, contre 13 % en moyenne.

Les élèves de Brive sont les plus nombreux à répondre (100 %), à fournir la réponse correcte à toutes les questions ou des éléments de réponse corrects, mais ce sont aussi les plus nombreux (25 %) à utiliser une seule loi, soit celle série, soit celle dérivation étendue à l'ensemble des dipôles quelque soit leur branchement. Cette généralisation, ou non différenciation correspond peut-être à une étape de l'apprentissage des propriétés de la d.d.p. et à un passage trop précipité au formalisme. Il serait intéressant de pouvoir vérifier cette hypothèse.

2 – e – Réponses recueillies concernant le concept d'intensité

2 – e – 1 – Tableaux des réponses qualitatives

Analyse des réponses concernant le générateur : (tableau des réponses page suivante)

Le **raisonnement systémique au niveau du générateur** est celui de 47 % des élèves de Brive, 32 % de ceux de Nantes et 4 % à Lille ! Soit une moyenne de 26 %.

A Brive 13 / 16 de ces réponses, soit plus de 80 % correspondent à une évolution correcte du débit, alors qu'à Nantes ce sont 7 / 18, soit moins de 40 %, erreur expliquée le plus souvent par leur représentation uniquement « résistive » ou résistante du conducteur ohmique, mêlées dans toutes les populations à quelques réponses en termes d'énergie.

Le **raisonnement considérant le débit du générateur constant** reste celui de 44 % de la population de Brive, 60 % de Nantes, 68 % de Grenoble et 79 % de Lille qui attribue cette propriété au générateur.

Brive est la seule population qui compte le plus de raisonnements avec un générateur dont le débit varie. Les élèves de Brive et de Nantes sont les plus nombreux à imaginer un générateur dont le débit varie. Les élèves de Grenoble et de Lille sont à la fois les plus nombreux à conserver le débit du générateur ou à ne pas fournir de réponse.

Tableau des représentations du débit du générateur

Académie Effectif	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 56 élèves
Débit du générateur				
I g varie :	13 / 34	3 / 28	0 / 28	7 / 56
Réponse correcte	38 %	11 %	0	13 %
Total des réponses où I g varie :	16	3	1	18
(correctes ou non)	47 %	11 %	4 %	32 %
Générateur à débit constant :	15	21	22	34
Ig = Cte	44 %	75 %	79 %	61 %
Sans réponse	0	4	5	0
	0 %	14 %	18 %	0 %

Tableau des représentations du fil

Académie Effectif	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 56 élèves
Débit traversant le fil :				
Réponse correcte	24 / 34	11 / 28	10 / 28	38 / 56
	71 %	39 %	36 %	68 %
I fil nulle	8	2	3	8
	24 %	7 %	11 %	14 %
Sans réponse	0	6	6	0
	0	21 %	21 %	0

Analyse des réponses concernant le fil :

Des réponses incomplètes n'ont pas permis d'atteindre la représentation du fil de certains élèves, particulièrement dans deux populations : 16 % des réponses de Nantes et 18 % de celles de Lille.

La réponse correcte est partout majoritaire, comme il existe dans toutes les populations des élèves pour prévoir une intensité nulle dans les fils (leur nombre peut aller jusqu'à près du tiers du nombre des réponses correctes de Brive ou de Lille).

A cette question on note 21 % de sans réponse à Grenoble comme à Lille alors qu'il n'y en a pas à Brive et Nantes. Un élève de Lille, et 21 % des élèves de Grenoble prévoient un débit différent pour deux fils d'une même boucle (réponse séquentielle).

Tableau des raisonnements empruntés sur le circuit en série

Académie Effectif	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 55 élèves
Raisonnement				
systémique	23 / 34	9 / 28	6 / 28	36 / 55
	68 %	32 %	21 %	65 %
séquentiel	2	6	5	9
	6 %	21 %	18 %	16 %
à courant constant	3	7	8	4
	9 %	25 %	28 %	7 %
local	3	2	2	6
	9 %	7 %	7 %	11 %

Remarque : le raisonnement majoritaire à Brive et Nantes est le raisonnement systémique tandis que pour Lille et Grenoble, le raisonnement le plus emprunté après le raisonnement systémique se trouve être le raisonnement à courant constant. Cette observation est en accord avec les suivis d'élèves qui ont montré que le raisonnement à courant constant était pour certains élèves une étape nécessaire avant le raisonnement systémique, alors que d'autres peuvent la sauter. Les élèves de ces classes semblent suivre le même chemin que ceux de Brive ou Nantes, mais avec un léger retard : il y reste aussi plus de raisonnement séquentiel...

Tableau des élèves au raisonnement correct sur les différents circuits

Académie Effectif	Limoges (Brive) 34 élèves	Grenoble 28 élèves	Lille 28 élèves	Nantes 55 élèves
Raisonnement correct sur :				
le circuit série	23 / 34 68 %	9 / 28 32 %	6 / 28 21 %	36 / 55 65 %
le circuit avec une dérivation	26 76 %	8 29 %	4 14 %	27 49 %
l'ensemble du questionnaire	9 26 %	1 4 %	0 0	2 4 %

Analyse :

1 - Raisonnements sur le circuit série fermé : on note un pourcentage voisin de réponses correctes sur le circuit série d'une part à Brive (68 %) et Nantes (65 %) et d'autre part à Grenoble (32 %) et Lille (21 %).

A Brive c'est la réponse de loin la plus fréquente, les autres ne dépassant jamais 10 %. On peut classer les raisonnements par leur fréquence :

systémique >> courant constant = local ≥ séquentiel

A Nantes c'est aussi la réponse majoritaire, mais on rencontre 16 % de raisonnement séquentiel, 11 % de local et 7 % de courant constant. Le classement donnerait :

systémique >> séquentiel > local > Courant constant

A Grenoble, s'il y a 32 % de raisonnement correct, il y a aussi 25 % de raisonnement à courant constant, réponse que nous avons pu évaluer comme dernière étape d'apprentissage avant le raisonnement correct, mais encore 21 % de raisonnement séquentiel et 14 % de sans réponse. Voici le classement :

Systémique ≥ courant constant ≥ séquentiel > local

A Lille, la principale réponse est à courant constant (28 %), puis le raisonnement correct (21 %), puis le raisonnement séquentiel (18 %) avec le plus fort taux de sans réponse (21 %). Ici on trouve le classement :

Courant constant > systémique ≥ séquentiel > local

On observe donc des différences sensibles de niveau d'apprentissage d'une population à l'autre.

2 - Raisonnements sur le circuit avec une dérivation : fréquence de la réponse correcte :

Brive 22 / 34 = 65 % (*26 / 34 = 76 %) Grenoble 5 / 28 = 18 % (*8 / 28 = 29 %)
Nantes 11 / 55 = 20 % correctes (*27 / 55 = 49 %).

La population de Brive est aussi familière de ce montage que de celui en série, alors que celle de Nantes avec 20 % de réponses correctes se rapprocherait de celle de Grenoble, si on ne tient pas compte du fort contingent d'élèves qui prévoient une évolution en sens contraire : si on compte tous les élèves au raisonnement systémique (*) ils sont proportionnellement plus nombreux à Nantes qu'à Grenoble. On peut toutefois remarquer que c'est la population qui fournit le plus de prévisions systémiques dont l'évolution se ferait en sens contraire de celle que prévoit le physicien. Sa conscience de l'interaction entre les éléments du circuit est voisine de 50 %, mais il lui manque une meilleure connaissance du conducteur ohmique, ce dont nous avons déjà parlé.

2 - e - 2 - Réponses numériques recueillies

A cette dernière question, les réponses fournies par les deux populations de Nantes se sont révélées par trop différentes pour être comptabilisées ensemble.

Il convient, à cette occasion, de signaler qu'une élève ayant daté ses feuilles, il est apparu que l'une des classes avait répondu en deux fois à une semaine d'intervalle, ce qui peut expliquer l'inhomogénéité des documents reçus : certains élèves ont eu à répondre deux fois à des questions qualitatives similaires et n'ont pas eu de questions chiffrées, alors que d'autres n'étaient présents qu'à une seule séance... Nous ne pouvons alors que déplorer les mauvaises conditions dans lesquelles s'est déroulé ce travail et qui peuvent être à l'origine d'une baisse du niveau des réponses à cette question.

Tableau des réponses numériques correctes sur les différents circuits

Académie Réponse correcte sur le	Limoges (Brive)	Grenoble	Lille	Nantes	Nantes
circuit simple	23 / 34 élèves 68 %	13 / 28 46 %	9 / 28 32 %	13 / 26 50 %	19 / 25 76 %
circuit série	11 / 16 70 %	5 / 19 26 %	1 / 13 8 %	4 / 11 36 %	11 / 16 70 %
circuit //	8 / 16 50 %	0 / 5 0	1 / 15 7 %	0 / 14 0	1 / 9 11 %
circuit mixte	13 / 32 40 %	3 / 24 12 %	2 / 28 7 %	0 / 24 0	6 / 24 25 %
ensemble du questionnaire	12 / 34 35 %	3 / 28 11 %	1 / 28 4 %	0 / 26 0	5 / 25 20 %

Analyse

La comparaison entre les lignes de ce tableau montre une **diminution des réponses correctes** dans toutes les populations d'élèves. La réponse à ces questions demande à l'élève un travail de synthèse : quelle que soit sa démarche, il doit faire appel à diverses connaissances dont la loi d'Ohm, les lois de l'intensité et / ou la résistance équivalente en s'appuyant sur les valeurs trouvées de la d.d.p. à la question précédente.

Ces remarques peuvent expliquer ce premier constat, et se trouvent confirmées par le nombre plus important de réponses ainsi que de réponses correctes, à la partie portant sur le circuit simple qui ne nécessite que l'application de la loi d'Ohm. La réponse correcte sur les circuits à plusieurs récepteurs demande des étapes : la représentation, fréquente chez les élèves, qui consiste à considérer que le débit du générateur reste invariable quelle que soit l'évolution de son circuit, leur permet de répondre de façon beaucoup plus simple. Aussi peut-on noter l'importance du nombre de réponses où l'élève conserve un débit constant au générateur, nombre que l'on aurait envie de comparer aux réponses qualitatives concernant le débit.

Prenons, pour commencer, le cas du circuit série, et observons la **fréquence des réponses conservant le débit du générateur constant** quand on modifie le circuit :

Tableau des réponses conservant le débit du générateur constant (I_g constant) dans un circuit série qui évolue

Académie		Limoges (Brive)	Grenoble	Lille	Nantes	Nantes
Question	Réponse					
Qualitative	I_g constant	8 / 34 élèves 24 %	15 / 28 53 %	15 / 28 53 %	10 / 26 38 %	9 / 29 31 %
	sans réponse	0	4	6	0	0
		0	14 %	21 %	0	0

Académie		Limoges (Brive)	Grenoble	Lille	Nantes	Nantes
Question	Réponse					
Numérique	Ig constant % des élèves	3 / 16 élèves 19 %	6 / 19 32 %	2 / 13 15 %	5 / 11 45 %	4 / 16 25 %
	Ig constant % des réponses	3 / 16 rép. 19 %	6 / 15 40 %	2 / 5 40 %	5 / 10 50 %	4 / 15 27 %
	sans réponse	0 0	4 21 %	8 62 %	1 9 %	1 6 %

Quelque soit le mode de calcul il apparaît, en moyenne, plus de réponses avec un générateur à débit constant dans les réponses qualitatives que dans les numériques : **calculeraient-ils mieux qu'ils ne raisonnent ?**

On serait plutôt conduit à rechercher une explication à la diminution de représentation du générateur caractérisé par son débit au niveau des élèves qui n'ont pas fourni de réponse numérique. En effet, dans les classes où les élèves ont répondu à l'ensemble du questionnaire (Brive et Nantes), le pourcentage de réponses avec un générateur à débit constant est voisin que la réponse fournie soit qualitative ou numérique.

Observons maintenant la fréquence de la représentation d'un générateur à débit constant sur le circuit qui évolue avec des dérivations :

Tableau des réponses conservant Ig constant lors de l'évolution d'un circuit avec dérivations

Académie		Limoges (Brive)	Grenoble	Lille	Nantes	Moyenne
Question	Réponse					
Qualitative	Ig constant	7 / 34 élèves 21 %	16 / 28 57 %	17 / 28 61 %	26 / 55 47 %	66 / 145 45 %
	sans réponse	1 3 %	4 14 %	7 25 %	2 4 %	14 10 %
Numérique	Ig constant % des élèves	8 / 16 élèves 50 %	3 / 5 60 %	6 / 15 40 %	18 / 23 78 %	35 / 59 59 %
	Ig constant % des réponses	8 / 16 rép. 50 %	3 / 4 75 %	6 / 7 86 %	18 / 20 90 %	35 / 47 74 %
	sans réponse	0 0	1 20 %	8 53 %	3 13 %	12 20 %

Au niveau des réponses qualitatives, pour chacune des académies le pourcentage de réponse reste voisin, quoiqu'en très légère élévation. Par contre le pourcentage de réponses numériques croît de façon très importante. Sur ce circuit **tous raisonnent mieux qu'ils ne calculent**, ce qui paraît cohérent avec deux facteurs :

- on peut penser qu'il y a un raisonnement qui pilote les calculs, et de plus
- les calculs nécessitant des étapes, étapes que l'élève doit imaginer, en éprouver le besoin : l'élève aurait tendance à retrouver les représentations satisfaisantes par le passé, conduisant beaucoup plus vite à une réponse... moins laborieuse à trouver.

Analysons quelles sont les démarches utilisées pour trouver le débit du générateur :

Bien que le texte demande explicitement la rédaction des calculs, peu d'élèves nous en ont laissé une trace. On a pu relever les élèves indiquant une valeur de la résistance équivalente R_e , avec parfois son calcul. D'autres élèves ont recherché R_e mais avec une formule fausse, telle $R_e = \Sigma R$ sur le circuit mixte, ou

$R_e = \Sigma 1 / R$ sur celui en dérivation. Sur 24 réponses correctes portant sur le circuit mixte, 12 élèves ont donné la valeur de R_e , soit 50 % des réponses correctes (dont 10 / 13 à Brive, population qui a fourni 40 % de réponses correctes).

Parmi les élèves qui ont fourni la **réponse correcte** à propos du **débit du générateur**, tous n'ont pas fourni toutes les valeurs du débit correctes. Pourquoi ? Ces réponses se rencontrent dès qu'il y a association de dipôles, en série, en dérivation ou montage mixte. Ce sont des élèves qui sont arrivés à I_g par le calcul de R_e mais qui poursuivent leur recherche avec une hypothèse fautive, comme par exemple :

- sur le circuit série $I_g = \Sigma I \text{ dipôles (loi U)}$
- sur le circuit dérivation ou mixte $I \text{ dipôle constant.}$

En conclusion, il semblerait qu'ils raisonnent tous mieux qu'ils ne calculent, surtout lorsque le circuit se complique et que la démarche mathématique demande des étapes. Alors le générateur aurait tendance à être de plus en plus caractérisé par son débit, plus que par la différence de potentiel à ses bornes.

Si nous comparons maintenant les réponses numériques fournies dans les différentes académies, les différences observées sur les réponses qualitatives se retrouvent, avec de meilleures réponses à Brive, puis Nantes, puis Grenoble et Lille, et ce quel que soit le circuit. Il nous reste à émettre des hypothèses sur l'origine de cette diversité des acquis, en partant d'un même document de travail, d'une même démarche pédagogique.

2 – f – Hypothèses sur l'origine de la diversité des acquis

2 – f – 1 – Conditions de mise en oeuvre de la séquence

Les tableaux montrent des résultats différents d'un expérimentateur à l'autre. D'après les documents qu'ils ont transmis nous sommes amenés à penser qu'ils ont conduit **une expérimentation fidèle aux documents écrits fournis**. Ils ont nécessité d'être plus ou moins complétés d'informations données soit par :

- le formateur IUFM à Nantes
- le chercheur, oralement pour Lille ou par écrit à Grenoble.

Ce qui implique qu'une expérimentation à plus grande échelle, sans intervention extérieure, nécessiterait des informations complémentaires, soit :

- par une formation des enseignants, ce qui aurait la plus grande efficacité, car ils pourraient ensuite, à loisir, réinvestir leurs acquis dans tout leur enseignement...
- soit, faute de moyens suffisants, par des notes plus abondantes, qui pourraient être rédigées à l'aide des questions posées par l'enseignante de Grenoble.

Les **différences** observées au niveau des **réponses** recueillies au **test final** sont sans doute liées aux **contextes variés** dans lesquels il s'est déroulé : chez le chercheur c'était presque le test de passage en première scientifique, tandis qu'ailleurs ce fut parfois quasi un devoir de vacances... Ces conditions diverses perturbent l'analyse des différences observées d'une académie à l'autre.

2 – f – 2 – Observons quelles ont été pour les élèves les clés d'accès à la réponse correcte

Nous allons rechercher, dans les justifications fournies (aux réponses correctes), les raisonnements utilisés préférentiellement par les élèves qui les ont conduits aux prévisions correctes :

Le concept de d.d.p.

La démarche du physicien peut passer par la d.d.p.. C'est la démarche de Thierry, qui au circuit mixte, obtenu en ajoutant la branche EF au circuit série (montage $(AB + BC) // EF$) prévoit :

I_{PN} augmente

« la nouvelle branche AFED demande de l'intensité »

I_{AB} reste constante

« la d.d.p. U_{AB} reste la même et la R est la même donc l'intensité reste la même. »

Justine explique, pour la même question du même montage :

I_{PN} augmente

« la valeur de la résistance diminue et la d.d.p. reste la même et $U = R I$. »

Mais sa prévision I_{AB} reste constante est mal justifiée.

Ils utilisent le concept de d.d.p. par l'intermédiaire de la loi d'Ohm, explicitée ou non, et pour Justine peut-être fait-elle aussi référence à la résistance équivalente (elle fournit un calcul correct de R_e dans la partie

quantitative du questionnaire) lorsqu'elle affirme « *la résistance diminue* ». Peut-être y a-t-il d'autres élèves qui ont utilisé la d.d.p. parmi les réponses exactes non justifiées ?

Observations des justifications de Brive

La population de Brive a souvent justifié ses prévisions en utilisant des arguments inexistants ailleurs. Par exemple :

- sur le circuit série modifié par ajout ou retrait d'une résistance, il y a plus de la moitié des élèves pour utiliser la métaphore du **frein** : un dipôle de plus en série c'est un frein de plus à la circulation et le contraire. On trouve cette justification dans 20 prévisions correctes sur 24, soit plus de 80 % de celles-ci, et 2 prévisions fausses liées à un générateur à débit constant.
- sur le circuit avec dérivation, modifié par ajout ou retrait d'une branche, c'est la métaphore du **chemin** : un dipôle de plus en dérivation c'est un chemin supplémentaire pour la circulation et le contraire. On rencontre cette justification dans 15 prévisions correctes sur 22, soit près de 70 % de celles-ci et aucune prévision fausse.

Ces images, retenues par les élèves, largement employées à bon escient, semblent les aider à se représenter le rôle du conducteur ohmique placé en série, son influence contraire lorsqu'il est monté en dérivation. Cette observation, nous conduit à penser que **nous avons davantage fait travailler l'approche qualitative** s'appuyant sur des **analogies** adéquates. Ayant fait le choix raisonné de bâtir la séquence, entre autres, sur cette hypothèse nous nous en sommes probablement beaucoup plus servi.

En résumé, l'approche qualitative du rôle du conducteur ohmique, mise en oeuvre à plusieurs reprises, (servant elle-même d'approche progressive à l'évolution du caractère résistant du circuit à chacune des évolutions de celui-ci), semblerait être la démarche d'apprentissage permettant au maximum d'élèves de se construire une représentation différenciée du rôle du conducteur ohmique selon qu'il est relié en série ou en dérivation, qui leur permettrait de fournir des prévisions correctes.

2 – g – Conclusion

Synthèse des informations :

A l'entrée en seconde nous avons observé des connaissances (ou absence de connaissances) voisines.

A la lecture des **témoignages des enseignants** :

- on ne peut que supposer que les élèves qui ont travaillé en lien avec la séquence ont vécu une démarche d'apprentissage voisine. C'est une lacune grave de ne pas pouvoir en dire plus, indépendante de notre volonté, qui limitera la portée de nos conclusions ;
- par contre, on sait que le questionnaire final leur a été passé, malgré des consignes précises, dans des conditions très différentes : on peut regrouper Nantes et Brive d'une part, Lille et Grenoble d'autre part.

Après enseignement, on observe toujours les meilleures performances à Brive, qui se distingue par trois facteurs :

- l'enseignant est le chercheur ;
- les classes sont différenciées : on avait noté, avant enseignement une base identique sur les implicites du programme, mais des bases meilleures dans les domaines enseignés au collège, chez ces élèves ;
- pour cet enseignant, c'est la troisième année d'expérimentation, avec une cinquième classe.

Il paraît difficile d'évaluer l'impact de ces différents facteurs. On peut seulement se poser la question de l'importance de :

- **la formation** : en 98 – 99 la séquence était testée pour la première fois par un collègue de Brive, avec une classe dite scientifique, comme la mienne. Il ne m'a rien demandé de l'année et a travaillé uniquement à partir du document écrit. Ses élèves avaient fourni des réponses meilleures que celles de mes élèves aux questions portant sur la d.d.p. et des réponses voisines aux autres questions. A Nantes, les expérimentateurs étaient des stagiaires en lien avec un formateur IUFM initié à la didactique, mais livrés à eux même pour la séquence. Les résultats sont les plus voisins de Brive.

- **l'intérêt de l'élève pour la matière** : lors de l'expérimentation menée à Brive en 98 – 99 avec des classes dites non scientifiques (à vocation essentiellement sciences économiques et sociales), leurs réponses étaient un peu moins bonnes que celles des élèves scientifiques ayant appris avec la séquence,

mais bien meilleures que celles des élèves dits scientifiques (ayant un projet professionnel nécessitant un bac S) ayant suivi un enseignement habituel, et ce, quelque soit l'enseignant de chacune des méthodes pédagogiques. Cela tendrait à démontrer l'intérêt de la démarche : nous en reparlerons plus loin.

Lien entre les hypothèses et les réponses : rappelons que pour améliorer la démarche d'apprentissage, on avait fait le choix :

- d'un **enseignement qualitatif**, illustré par des **analogies** qui semblent avoir joué un rôle au vu :
 - o des justifications à certaines réponses correctes, mais uniquement à Brive. C'est sans doute une absence de prise en compte de leur importance par les autres enseignants, par manque de sensibilisation ;
 - o des remarques d'enseignants, sensibles à l'intérêt des analogies, mais qui ne les ont sans doute pas assez exploitées ;
- d'aborder l'**aspect énergétique**. Seul un enseignant y fait référence. On peut penser qu'il contribue, pour une part, à la baisse du taux de réponses séquentielles ;
- de la **pédagogie de la maîtrise**, ce qui a conduit à :
 - o poser des questions sur des éléments de circuit jamais enseignés, tels l'interrupteur ouvert, le générateur, le fil ou la pile, dans le but de mieux se représenter la boucle conductrice du circuit ;
 - o développer les réinvestissements afin, soit de multiplier les occasions de comprendre, soit de préciser la connaissance en diversifiant les circuits électriques.

Cette hypothèse constitue l'ossature de la séquence ; elle a eu des conséquences sur le déroulement de l'apprentissage, si l'enseignant l'a suivie ce qui paraît probable.

En fait, on a mis en œuvre un « bouquet d'hypothèses », en lien avec une démarche de test d'hypothèses, qui modifie le contrat didactique auquel enseignants et élèves sont habitués. Ce « bouquet » semblerait bien participer, même avec des enseignants n'ayant reçu aucune formation particulière, même avec des élèves aux projets divers, à une amélioration de l'apprentissage au vu des progrès cognitifs observés.

En résumé, nous avons eu l'occasion d'observer des différences de performances d'une population à l'autre ayant appris avec la séquence qui pourraient être liées :

- à la différence d'état initial (entre classe scientifique et indifférenciée) ;
- à la différence de contexte dans lequel le questionnaire final a été passé ;
- à la différence de formation des enseignants.

Un enseignant formé à la didactique ayant le souci des hypothèses en jeu et des élèves intéressés, ces deux conditions associées sembleraient permettre les plus grands progrès cognitifs. La démarche adoptée entraîne l'élève dans un processus d'apprentissage qui lui permettrait d'acquérir d'autant plus de connaissances :

- qu'il s'intéressera et se posera des questions,
- et que son enseignant sera formé à le guider sur son chemin en lui ménageant des étapes. On a en effet constaté que ces élèves sont par exemple les seuls, six mois après enseignement, à faire appel à la résistance équivalente.

III – Les acquis sont-ils éphémères ?

Lors de nos différents essais à Brive, nous avons eu l'occasion de suivre les progrès cognitifs des élèves ayant appris avec la séquence. Nous avons voulu savoir si ces acquis n'étaient qu'un vernis vite oublié, ou au contraire, s'ils constituaient une base solide et durable. Pour cela, nous avons passé le même questionnaire en Mai 1999 à tous les élèves de seconde ayant appris avec la séquence (ainsi qu'à d'autres élèves de seconde en vue d'une évaluation externe) puis en Mai 2000 à tous les élèves de 1^{er}S au cours de l'année 1999-2000. Depuis la classe de seconde, ces élèves n'avaient plus eu de réel enseignement de l'électricité dans le cadre du programme de sciences physiques de 1^{er}S.

Quelles différences entre les deux populations qui ont répondu à un an d'intervalle ?

Entre la classe de seconde et celle de première S s'est effectué une **sélection** qui permettait d'envisager une possible amélioration relative des réponses. Toutefois, les réponses recueillies nous ont obligé à prendre également en compte l'enseignement reçu par les élèves qui ont choisi l'**option sciences expérimentales**. Ces élèves (le quart de la population de 1^{er}S) avaient trois heures de travaux pratiques hebdomadaires (une semaine sciences physiques, une semaine biologie) quand les copains étaient libres : on peut émettre l'hypothèse qu'ils

sont plus intéressés par les sciences expérimentales que les autres. Cet enseignement, sous la conduite du chercheur, portait, au premier trimestre, sur des composants électroniques (diodes, thermistances, photo résistances, transistors, amplificateur opérationnel...). La première séance de 3h., à la rentrée de Septembre, démarrait avec un questionnaire en vue d'un test expérimental d'hypothèses sur les propriétés des concepts d'intensité, de d.d.p. et de résistance, question de vérifier ou de préciser les connaissances de base sur le circuit électrique, avant de découvrir le fonctionnement de nouveaux composants. Il fournissait l'occasion d'une remédiation sur le fonctionnement des circuits de une à trois résistances avant de donner des renseignements sur les appareils permettant les mesures associées aux trois concepts fondamentaux.

On peut imaginer que l'effet de la sélection ait été renforcé par cette séance de quinzaine : bien qu'elle porte sur des composants électroniques, elle pouvait entretenir les représentations en électrocinétique. Toutefois le questionnaire a été passé au mois de mai, éloigné, selon les élèves, de six à dix huit mois de tout enseignement.

Le but de ce questionnaire était d'examiner ce qui reste des acquis sur les concepts à la base de l'électrocinétique, en fin de première, en fonction de l'enseignement reçu. Le questionnaire étant anonyme, nous avons demandé aux élèves de première de nous indiquer la classe dans laquelle ils se trouvaient l'année précédente. Ainsi, nous avons pu classer la population en fonction de l'enseignement suivi en seconde. Nous distinguerons les réponses venant d'élèves issus d'une classe où la séquence était enseignée de celles d'élèves issus d'une classe avec un enseignement plus habituel. Nous ne nous intéresserons qu'aux 80 élèves venus de secondes où le questionnaire avait été passé, et dites « scientifiques » (ayant fait part, à l'entrée en seconde, d'un projet professionnel nécessitant un bac scientifique). Ce questionnaire, le même que celui passé en fin de seconde, permet des comparaisons, qui resteront relatives, pour les raisons que nous venons d'explicitier.

Nous n'allons pas développer les réponses recueillies à toutes les questions. Nous avons pensé que la lecture en serait fastidieuse. Pour chaque concept nous fournirons les principales réponses recueillies sur les circuits à un ou deux récepteurs, en fin de seconde puis en fin de première avec leur analyse. Nous tenterons un essai de synthèse en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence.

1 – Concept de circulation

1 – a – Réponses qualitatives portant sur le circuit simple

(Question 1, annexe VI. 5-10)

Tous les élèves ont non seulement répondu, mais fourni une réponse justifiée à cette question. Ils nous donnent ainsi une idée assez précise de leur façon de concevoir la circulation du courant.

Nous n'avons pas tenu compte des réponses données en classe de 1^o par des élèves auxquels le questionnaire n'avait pas été passé en classe de seconde. Voici les réponses recueillies en fin de seconde, puis en fin de 1^o par des élèves ayant eu à répondre au même questionnaire à un an d'intervalle :

1 – a – 1 – Réponses qualitatives sur le circuit simple

Tableau des réponses aux questions qualitatives sur le circuit simple

Réponse	Correcte	Correcte	Séquentielle	Séquentielle	Locale	Locale
Année Classe	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o
Enseignement						
Séquence	55 / 62 88,7 %	33 / 39 84,6 %	0	2	1	1
Autre enseignement	34 / 66 51,5 %	29 / 41 70,7 %	11	5	6	5

Sur cette première question portant sur le concept d'intensité, si on regarde les réponses des élèves ayant appris avec la séquence, il n'y avait aucun raisonnement séquentiel en seconde et il en est apparu deux en première, il est également apparu un raisonnement local dans une classe (et disparu un dans une autre).

La comparaison des réponses des élèves ayant suivi un autre enseignement montre une **amélioration** importante entre la classe de seconde et celle de première. Dans un premier temps on aurait pu penser qu'il pouvait être imputable uniquement à la **sélection** effectuée lors de l'autorisation de passage en classe de 1^{er}S. Mais, en y regardant de plus près, il se trouve, dans l'une des classes, cinq élèves de plus en première pour fournir une réponse compatible avec la physique. La sélection ne peut pas justifier à elle seule ce progrès. L'explication pourrait se trouver au niveau de l'**option sciences expérimentales** suivie par dix élèves de cette classe : on est amené à penser qu'elle a pu déstabiliser certains raisonnements et permis d'accéder à plus de cohérence dans la représentation des concepts de l'électricité. Dans cette classe, la régression des raisonnements locaux et séquentiels, et la progression de prévisions compatibles avec la physique, auraient alors deux origines :

- la **sélection** à l'entrée en 1^{er}S, et
- la **remédiation** qu'auraient constituée les révisions d'électricité introductrices à la partie électronique de l'option sciences expérimentales, en début d'année de première.

En résumé : on peut penser que pour les élèves ayant suivi la séquence la sélection a eu peu d'influence et les révisions ont conforté ceux qui en ont profité. C'est pourquoi il apparaît un effet de saturation au niveau des réponses correctes et une **grande stabilité relative des acquis**.

Au contraire, pour les élèves hors séquence, l'effet de la sélection semble entrer en résonance avec l'enseignement de sciences expérimentales. S'il a peu influé sur les élèves de la séquence, il a plus joué sur ceux qui ne l'ont pas eu. Ce type d'enseignement apparaît particulièrement efficace pour ces élèves sélectionnés et motivés. On ne peut que regretter la disparition, avec le nouveau programme de l'espace de remédiation que pouvait constituer cette option.

1 – a – 2 – Analyse des réponses des élèves de la séquence en lien avec les objectifs poursuivis par cet enseignement

Cette question portait sur la continuité du débit le long d'une boucle fermée. Elle était liée à un objectif d'apprentissage de la séquence : donner un sens au concept d'intensité, avec des **étapes**, comme la représentation d'une **circulation** à l'intérieur d'une boucle fermée possédant un générateur puis d'une circulation à **débit constant** en tout point. On peut par exemple observer :

- les discontinuités du débit

On peut observer les discontinuités du débit, en fin de première, au niveau du récepteur avec le raisonnement local (1 élève), au niveau des fils pour l'élève qui prévoit une intensité nulle dans les fils, entre l'entrée et la sortie des dipôles pour les deux élèves au raisonnement séquentiel.

Un an plus tard nous avons trouvé quatre élèves, ayant appris avec la séquence, n'ayant pas de représentation circulatoire correcte sur le circuit simple.

- le vocabulaire utilisé pour justifier

Les élèves qui justifient une réponse correcte à cette question la justifient essentiellement à l'aide de la loi apprise « *l'intensité est la même en tout point* » sans éprouver le besoin de décrire une circulation au sein du circuit.

1 – b – Réponses qualitatives sur le circuit simple si la valeur de la résistance change (Question II, annexe VI. 6-11)

1 – b – 1 – Tableau des réponses aux questions qualitatives sur un circuit simple évolutif :

Réponse	Correcte	Correcte	A C.Ct.	A C.Ct.	Séquentielle	Séquentielle
Année Classe Enseignement	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o	98-99 2 ^o	99-00 1 ^o
Séquence	43 / 62 69,4 %	33 / 39 84,6 %	9 / 62 14,5 %	2 / 39 5 %	3 / 62 4,8 %	3 / 39 7,7 %
Autre	14 / 66 21,2 %	19 / 41 46 %	17 / 66 25,8 %	9 / 41 21,9 %	18 / 66 27,3 %	10 / 41 24,4 %

Comme pour les autres tableaux, l'analyse se révèle délicate : il faudrait pouvoir regarder élève par élève, ceux qui ont conservé le même raisonnement et ceux qui en ont changé et savoir quelle fut l'influence de l'option avec le chercheur. En effet, on pourrait imaginer que les 39 élèves de la séquence maintenant en 1^{er}S soient parmi les 43 élèves ayant fourni la réponse correcte en fin de seconde... ce n'est sans doute pas le cas, mais on ne peut pas plus parler d'une amélioration.

1 - b - 2 - Analyse des réponses des élèves de la séquence en lien avec les objectifs poursuivis par cet enseignement

- **nature de la justification de la réponse compatible avec la physique :**

- 8 / 33 élèves s'appuient sur **l'image du frein**, ce qui représente 24,2 % des réponses correctes d'élèves de la séquence (on peut remarquer que cette image est également employée par 3 autres élèves dont on peut penser qu'ils l'ont trouvée au cours de l'option).

- 9 / 33 élèves s'appuient sur **la loi d'ohm**, ce qui représente 27,3 % des réponses correctes d'élèves de la séquence.

- les 16 / 33 autres réponses correctes ont une **approche qualitative à la justification imprécise**. Elles représentent 48,5 % des réponses correctes d'élèves de la séquence.

Le travail qualitatif de la séquence se traduit par des justifications majoritairement qualitatives, mais dont seulement le tiers sont rigoureuses, les autres s'appuyant sur la loi d'Ohm.

- **travail sur le débit du générateur** : il semble avoir porté ses fruits sur le long terme, puisqu'on ne trouve que 5 élèves à le considérer constant parmi ceux ayant suivi la séquence : 2 élèves raisonnant à courant constant et 3 utilisant un raisonnement séquentiel soit 5 / 39, c'est à dire 12,8 %.

L'interaction entre les éléments composant un circuit simple reste acquis par 34 élèves sur 39 de la séquence, soit 87 % d'entre eux. Cette connaissance est aussi en lien avec le

- **travail sur le sens d'une loi** : certains élèves justifient leur raisonnement à courant constant par :

« *l'intensité est la même en tout point du circuit.* » ou « *l'intensité est la même en tout point d'un circuit série.* »

Ces justifications étaient connues du chercheur ayant rédigé la séquence. Aussi, lorsque les élèves ont découvert, admis, avec l'aide de l'analogie de la chaîne de vélo, l'unicité du débit le long d'un circuit série, il y a eu des réinvestissements en faisant varier le dipôle récepteur ou leur nombre ou leur branchement ... question de s'apercevoir de la validité de cette loi sur différents exemples. Elle était vérifiée, le long d'une boucle, ou d'une branche, mais comme la chaîne peut tourner plus ou moins vite, l'intensité prenait des valeurs différentes d'un montage à l'autre : ce qui caractérisait le générateur, ce n'était donc pas son débit mais la d.d.p. à ses bornes.

L'idée simplificatrice, et par là même tenace d'un générateur au débit constant, semble, sur ce circuit simple, avoir fait place, de façon stable, chez 85 % des élèves ayant vécu la séquence à un débit modulable par les dipôles récepteurs, au moins sur le circuit simple : l'intensité est bien la même en tout point ... mais sa valeur dépend du circuit. Le temps consacré à des réinvestissements sur des circuits évolutifs ne semble pas superflu.

1 - c - Réponses aux questions qualitatives portant sur le circuit série

(Question III, annexe VI. 7)

1 - c - 1 - Tableau des principales réponses aux questions qualitatives sur le circuit série

Réponse Année Classe Enseignement	Correcte 98-99 2 ^o	Correcte 99-00 1 ^o	A C.Ct. 98-99 2 ^o	A C.Ct. 99-00 1 ^o	Séquentiel 98-99 2 ^o	Séquentiel 99-00 1 ^o
Séquence	27 / 59 46 %	15 / 20 75 %	12 / 59 20 %	4 20 %	7 / 59 12 %	0
Autre	2 / 58 3 %	13 / 37 35 %	18 / 58 31 %	11 / 37 30 %	19 / 58 33 %	7 / 37 19 %

1 – c – 2 - Analyse des réponses des élèves de la séquence en lien avec les hypothèses, ou les objectifs de celle-ci

- **maîtriser les prérequis** : parmi les prérequis au concept d'intensité il y avait le concept de circulation, c'est à dire tout d'abord :

- **l'unicité du débit le long d'un circuit monté en série**

On a déjà vu que le raisonnement local ou séquentiel correspondait à une double discontinuité du débit. On observe qu'en réponse à cette question aucun élève de la séquence n'emprunte le raisonnement séquentiel. Le raisonnement à courant constant, ne correspond à aucune discontinuité.

Ce prérequis semble bien maîtrisé par les élèves ayant suivi la séquence. Il constituerait une étape utile vers le raisonnement systémique.

- **Puis l'effet sur cette circulation de l'ajout ou du retrait d'un dipôle résistant en série ou en dérivation**

On observe que 75 % de la population ayant vécu la séquence a conservé cet acquis, sur le circuit série, un an après son enseignement.

Définir des étapes d'apprentissage, les approcher, les préciser lors de réinvestissements pour multiplier les occasions de comprendre, telle a été la démarche de la séquence. Elle semble avoir permis à ces élèves de construire une connaissance assez cohérente, stable, pour leur servir un an plus tard.

- **une approche qualitative** : l'intérêt de cette approche ne peut se retrouver qu'au niveau des justifications. Certaines ne se trouvent que parmi les élèves ayant suivi la séquence ou l'option avec le chercheur, comme par exemple : « *il y a deux résistances, donc deux freins, donc beaucoup moins d'intensité que dans le I.* »

« *car il y a plus de résistances donc plus de freins à la circulation.* »

Cette image mécanique liée à notre analogie de la chaîne de vélo est utilisée pour justifier par 6 élèves ayant appris avec la séquence mais également 4 élèves de l'option en 1^{er}S ne l'ayant pas suivie.

Quels sont les autres arguments avancés pour justifier la réponse correcte ? L'image du frein, utilisée par 6 / 15 élèves de la séquence ayant fourni la réponse correcte, a été assez suggestive pour être aussi utilisée par 4 autres élèves n'en ayant entendu parler que par le chercheur lors de l'introduction à l'option sciences expérimentales en 1^{er}S. Ainsi, sur 28 réponses correctes 10 sont justifiées en parlant de frein et 6 élèves font référence à la loi d'Ohm : 22 élèves ont donc une justification purement qualitative, reflet de l'existence d'une représentation du circuit et d'une maîtrise du sens des concepts.

- **interaction circuit – générateur** : l'approche qualitative passe par l'utilisation d'analogies, dont la chaîne de vélo, comme analogie mécanique au circuit électrique. Parmi les similitudes il y a le lien entre la chaîne et le pédalier d'une part, et entre le circuit et le générateur d'autre part, analogie permettant d'illustrer, d'expliquer, d'interpréter puis de prévoir des évolutions du débit selon le circuit. Parmi les élèves ayant suivi la séquence il y en a 16 / 20 soit 80 % au raisonnement systémique (dont un élève, non comptabilisé dans les réponses correctes, justifie une diminution du débit lorsqu'on ajoute une résistance en série car « la résistance a diminué »).

Il semble que ce travail qualitatif permette de bâtir une représentation durable du lien qui s'établit entre un générateur et le circuit qu'il alimente.

- **approche énergétique** : en réponse à cette question, on ne rencontre pas de réponse énergétique. Le fait d'avoir abordé les transferts d'énergie au cours de la séquence, a peut-être aidé les élèves à ne plus lier intensité et énergie.

Conclusions : les différentes hypothèses mises à l'épreuve de la séquence semblent avoir permis, un an plus tard, aux élèves :

- par l'analyse qualitative de circuits, de mieux comprendre les concepts nécessaires au physicien pour en décrire le fonctionnement. Lors des réinvestissements, l'approche qualitative, en référence à une propriété du concept leur permet d'expliquer ou de prévoir comme le physicien pour 75 % d'entre eux ;
- par l'analogie de la chaîne de vélo, de se faire une idée de l'interaction permanente établie entre les différents éléments d'un circuit ce qui conduit 80 % de ces élèves à imaginer un générateur à débit variable ;
- par la maîtrise des prérequis, tel celui de circulation, une meilleure compréhension du concept d'intensité ;
- par un travail sur les échanges énergétiques au sein d'un circuit, de relier ces lieux d'échange à l'existence d'une différence de potentiel et ainsi à ne pas en rendre compte par une discontinuité, ou une élévation du débit (raisonnements absents chez les élèves de la séquence).

1 – d – Réponses aux questions qualitatives portant sur le circuit avec dérivation (Question III, annexe VI. 12)

1 – d – 1 – Tableau des réponses aux questions qualitatives sur le circuit avec dérivation

Nous allons regrouper les réponses en fonction du respect de certaines propriétés. Quand on ajoute une branche dérivée à un circuit simple on peut observer si pour l'élève :

- le débit du générateur reste constant ou évolue ;
- le débit obéit à la loi des nœuds ;
- le débit qui arrive à un nœud se répartit de façon équitable, ou bien s'il dépend des dipôles placés dans les branches.

Tableau des réponses aux questions qualitatives sur le circuit avec dérivation
en fonction de l'enseignement

Débit du générateur	Varie correct	Varie correct	Varie autre	Varie autre	Constant	Constant	Constant	Constant
Loi des nœuds	Respect	Respect	Respect	Respect	Respect	Respect	Viol	Viol
Partage	différent	=	différent	=	différent	=	différent	=
Séquence :	8	0	3	0	6	2	0	0
Débit du générateur	Varie : 11 / 19 58 %				Constant : 8 / 19 42 %			
Loi des nœuds	Respectée : 19 / 19 100 %						Violée : 0 %	
Autre :	5	1	0	2	17	3	5	2
Débit du générateur	Varie : 8 / 35 23 %				Constant : 27 / 35 77 %			
Loi des nœuds	Respectée : 28 / 35 80 %						Violée : 20 %	

Ce tableau peut être mis en lien avec certaines réponses trouvées en fin de classe de seconde :

Générateur	I varie	I varie	I constant	I constant	Sans réponse
Année	98-99	99-00	98-99	99-00	98-99
Classe	2°	1°	2°	1°	2°
Enseignement					
Séquence	27 / 64 42 %	11 / 19 58 %	35 / 64 55 %	8 / 19 42 %	2 / 64 3 %
Autre	12 / 56 21 %	8 / 35 23 %	34 / 56 61 %	27 / 35 77 %	10 / 56 18 %

Le premier tableau montre que l'ensemble des élèves de la séquence respectent la loi des nœuds en fin de 1^{er}S, dont une forte majorité (17 / 19) en imaginant un débit différent dans les branches.

Le deuxième tableau n'illustre peut-être pas un réel progrès, mais permet plutôt de constater la grande stabilité des acquis concernant la représentation d'un générateur à débit variable, entre la classe de seconde et celle de première, de cette population.

1 – d – 2 - Analyse en lien avec les hypothèses, ou les objectifs de la séquence

– le concept de nœud et comment la loi des nœuds traduit la conservation du débit. On s'aperçoit qu'elle est violée par les élèves qui conçoivent un générateur à débit constant et en même temps un débit constant dans R_1 , ce qui ne se trouve pas parmi les élèves ayant appris avec la séquence, un an après enseignement. Mais comment se fait le partage ?

Au collège les dipôles sont identiques et partage devient synonyme de partage égal d'après nos questionnaires passés avant enseignement en classe de seconde (ce qui est, de plus, compatible avec les raisonnements locaux et séquentiels). Qu'en est-il en fin de classe de première, avec des dipôles différents ? Il reste 2 élèves de la séquence, soit 10,5 % à le penser. C'est à dire que 17 / 19 élèves de la séquence admettent un partage qui dépend des dipôles situés dans les branches, soit 89,5 % qui le justifient par $R_2 > R_1$.

– **interaction circuit-générateur** : on a déjà parlé du travail effectué en cours de séquence pour déstabiliser la représentation d'un générateur à débit constant, en illustrant les liens d'action mutuelle entre le circuit et le générateur avec l'analogie de la chaîne de vélo. L'interaction circuit-générateur est présente dans 11 / 19 réponses de la séquence, soit 58 % (en série, 80 %).

Ces résultats sont à rapprocher de ceux du questionnaire sur le circuit série. Que le montage soit en série ou en dérivation, ils sont une majorité à envisager une interaction, en fin de 1^{er}S.

Dans le cas du circuit avec dérivations, faute de faire appel à la d.d.p., la référence à un générateur à débit constant a peut-être tenté certains, ce qui expliquerait des performances un peu moins bonnes.

- **rigueur de la justification** :

1 - **du débit à la sortie de R_1** : la différence la plus facile à relever est au niveau de l'utilisation de phrases pour répondre (complétées parfois de relations mathématiques), ou uniquement de relations mathématiques :

Tableau donnant la nature de la justification fournie au débit à la sortie de R_1

Enseignement	Explication	Phrase	Relation mathématique
Séquence	12 / 19	63 %	2 / 19 10 %
Autre	14 / 35	40 %	8 / 35 23 %

2 - **du débit traversant le générateur** :

- **représentation d'un générateur à débit constant** : l'élève ne pouvant s'appuyer sur une loi physique, se contente de préciser plus ou moins sa représentation, par exemple :

« nous avons le même générateur qui fournit la même intensité. »

- **la réponse la plus proche de la physique $i > I_2$** a trouvé des justifications plus représentatives, comme par exemple : *« le générateur doit fournir une intensité plus forte, car il y a plus de chemins proposés aux électrons. »*

3- **comparaison du débit traversant les deux résistances** : cette question permet de mieux cerner la rigueur de la démarche chez les élèves ayant fourni la réponse attendue. On observe deux démarches :

– la première consiste à faire appel à la d.d.p. et la loi d'Ohm (2 élèves de la séquence) ;

– l'autre consiste à se passer de la d.d.p. (sauf chez deux élèves où elle est implicitement la même), et à parler de **circuit avec dérivation** et de **partage** : comment ? Parmi les élèves de la séquence, 9 / 16 réponses sont justifiées, dont 5 / 9 avec l'image du frein.

Sur ces questions un peu plus compliquées les élèves « retombent » sur des réponses spontanées et font une analyse souvent trop rapide. Une bonne représentation qualitative est ce qui a mené le maximum d'élèves à approcher les prévisions de la physique aux questions II et III. A la question III seuls deux élèves de la séquence et deux autres ont eu une démarche rigoureuse passant par la d.d.p..

– **approche qualitative** : elle est la seule justification correcte trouvée à la question II, ce qui explique qu'elle soit plus fréquente chez les élèves de la séquence. Elle représente 6 / 33 justifications de la réponse correcte à la question III, alors que 10 / 33 s'appuient sur la loi d'Ohm. On peut se demander sur quoi s'appuient les autres prévisions : elles sont qualitatives, affirment des représentations énergétique ou séquentielle du rôle de la résistance, ou d'un partage équitable. Aucune n'est en référence avec une loi d'Ohm mal exploitée.

Conclusions

Certains élèves, (comme certains collègues), préfèrent une approche mathématique. Toutefois, lorsque l'approche qualitative est proposée, elle semble retenue préférentiellement, et permettre à plus d'élèves d'approcher une réponse correcte.

La démarche scientifique de justification est abandonnée au profit d'une autre, d'autant moins rigoureuse que la question déstabilise l'élève. Toutefois, ceux qui disposent de représentations qualitatives, ou des lois, les mettent en oeuvre et fournissent des éléments de la réponse correcte.

L'idée d'une interaction entre le générateur et son circuit semble acquise par une majorité d'élèves de la séquence : est-ce en lien avec l'analogie de la chaîne de vélo (ce qui expliquerait de moins bons résultats lorsque le circuit possède des dérivations ?), la multiplication des réinvestissements avec prévisions avant expérience ... ?

Nous ne faisons pas l'analyse sur les circuits mixtes, lourde et laborieuse. Elle aboutit à des observations complémentaires qui seront prises en compte lors de la conclusion. Nous en venons aux réponses numériques :

1 – e – Réponses numériques (Question V, annexe VI. 9-14)

1 – e – 1 - Question V₁ des deux questionnaires

Une immense majorité d'élèves ont fourni la réponse attendue. Il ne se trouve qu'un élève pour préciser < 50 mA, ce qui ressemble à un raisonnement séquentiel, présent tout au plus chez 1 / 39 élèves ayant suivi la séquence. Rappelons que la réponse correcte des autres élèves est tout autant compatible avec un raisonnement local, ou un raisonnement à courant constant, qu'avec le raisonnement correct.

1 – e – 2 - Question V₂ avec dipôles en série

Tableau des réponses numériques aux questions sur le circuit série
en fin de 1^{er}S

Réponse Enseignement	Correcte	Ig constant + lois physiques	Courant constant	Ig constant incomplète	Sans réponse
Séquence 19 élèves	6 32 %	3 16 %	6 32 %	1 5 %	3 16 %
Habituel 35 élèves	1 3 %	3 9 %	18 51 %	5 14 %	8 23 %

Tableau des réponses recueillies
en fin de seconde (mai 99)

Réponse Enseignement	Correcte	Ig constant	Sans réponse
Séquence 34 élèves	8 24 %	21 62 %	5 15 %
Habituel 39 élèves	0 0 %	23 59 %	16 41 %

La réponse correcte nécessite le détour par la résistance équivalente. Quels élèves ont calculé la résistance équivalente R_e et pourquoi ?

En classe de première les élèves qui ont calculé la résistance équivalente à l'association série, ont tous trouvé la réponse correcte, à savoir $R_e = R_1 + R_2 = 80 + 120 = 200 \Omega$ mais certains raisonnant avec une intensité constante pour la recherche de la d.d.p. ont travaillé avec $U_{AD} = 10 V$ et donc retrouvent $I = 50 mA$...

Tableau des élèves qui ont recherché Re
en fin de 1^oS

Réponse	Exacte	Fausse U = 10 V I = 50 mA	inachevé	Bilan : élèves ayant cherché Re
Enseignement				
Séquence	6 / 8 calculs	1 / 8	1 / 8	8 / 19 élèves 42 %
Habituel	1 / 4 calculs	3 / 4	0	4 / 35 élèves 6 %

Près de la moitié des élèves de la séquence ont calculé Re et les trois quarts (6 / 8) ont trouvé la réponse correcte.

Sans résistance équivalente, comment répondre ? La seule possibilité semblerait être de conserver constante l'intensité fournie par le générateur, ce qui correspond à la majorité des réponses quelque soit l'enseignement suivi, par exemple $16 + 32 + 5 = 53$ % des élèves ayant suivi la séquence (en classe de seconde 62 % des réponses).

- Analyse en lien avec les hypothèses, ou les objectifs d'apprentissage de la séquence

Un débit constant le long d'un montage en série, et plus généralement le long d'une branche, principale ou dérivée, était l'un des **objectifs de la séquence**. On observe qu'il n'est pas atteint pour 4 d'entre eux, soit 20 %. Si l'objectif n'est pas atteint dans la lecture qui en est faite sur cet exemple, la séquence a permis, semble-t-il, un réel progrès au niveau des conséquences de la conservation du débit le long d'une boucle fermée.

Par ailleurs, on rencontre ici un **autre objectif**, qui était d'**attribuer des propriétés spécifiques aux deux concepts I et U** : aucune confusion trouvée au sein de la population ayant appris avec la séquence. Sur cet exemple, un an plus tard, l'objectif semblerait atteint pour tous les élèves, pour autant qu'ils aient répondu...

Rappelons qu'un autre objectif visé par la séquence était de conduire les élèves à réaliser qu'il existait une interaction entre le circuit et le générateur : le tableau des réponses à cette question montre que 32 % des élèves de la séquence ont prévu une modification du débit du générateur suite à une modification du circuit, tandis que 53 % continuent à l'imaginer inchangé ...

Le travail effectué se retrouve un an plus tard sous la forme d'un objectif qui n'est pas atteint pour tous, mais qui a permis une évolution durable pour le tiers de la population.

1 – e - 3 – Question V₂ avec dipôles en dérivation

**Tableau des principales réponses recueillies aux questions numériques
sur le circuit avec une dérivation**

Réponse	Correcte	Correcte	A C.Ct.	A C.Ct.	Sans réponse	Incomplète ou ss réponse
Année	98-99	99-00	98-99	99-00	98-99	99-00
Classe	2 ^o	1 ^o	2 ^o	1 ^o	2 ^o	1 ^o
Enseignement						
Séquence	13 / 30 43 %	7 / 20 +1 incomplet 35 %	15 / 30 50 %	4 / 20 20 %	2 / 30 7 %	2 / 20 10 %
Habituel	1 / 34 3 %	6 / 37 16 %	18 / 34 53 %	3 / 37 8 %	15 / 34 44 %	7 + 1 / 37 22 %

Analyse : observons les connaissances utiles auxquelles certains élèves de la séquence ont fait appel

Légende : *en italique : réponses incomplètes avec Ig constant ;*
entre parenthèse (), R₀ calculé mais inutilisé.

**Tableau des outils utilisés pour répondre à la question sur l'intensité,
en plus de la loi d'Ohm**

Outil : loi d'Ohm	seule	+ Re	+ loi des nœuds	sans loi	Sans réponse
Année classe					
99 - 00 1°	4 / 20 20 %	3 + (1)	7 35 %	4 + 2 30 %	0
98 - 99 2°	18 / 30 60 %	2	10 33 %		3 10 %

En dehors de la loi d'Ohm, la loi la plus utilisée est la loi des nœuds : l'utilisation des deux a fourni 11 / 13 des réponses correctes (5 / 7 des élèves ayant suivi la séquence), les 2 autres ayant utilisé avec succès la résistance équivalente.

– analyse en lien avec les hypothèses de la séquence

α – continuité du débit traversant les conducteurs de la branche principal d'un circuit avec dérivations

**Tableau des élèves ayant respecté a continuité du débit le long de la branche principale
d'un circuit comportant une dérivation**

Loi Réponse	Respectée 800 mA Correcte	Respectée 600 mA lg constant	Respectée autre	Violée	? réponse incomplète
Enseignement					
Séquence 20 élèves	7 / 20 35 %	11 55 %	0	0	2
Habituel 37 élèves	6 / 37 16 %	16 43 %	2 (0 mA) 1 (1200 mA)	1	2 + (7ss.rép.)

Sur ce montage, cet objectif de la séquence semble acquis par $18 / 20 = 90 \%$ des élèves ayant suivi l'enseignement de la séquence.

β – interaction circuit-générateur

Sur ce montage en dérivation, l'interaction entre le circuit et le générateur a été pris en compte par 8 élèves de la séquence, soit 40 %, ce qui est comparable à ce qu'il était en classe de seconde (43 %)

Par contre, on observe un net progrès entre la classe de seconde et celle de première pour des élèves ayant suivi un enseignement habituel (ils sont passé de 1 à 6, quand dans le même temps ceux de la séquence passaient de 13 à 8). Ceci ne peut, semble-t-il qu'être l'effet de la remédiation apportée par le chercheur au cours de l'option sciences expérimentales.

Récapitulatif des réponses sur la question V_2 portant sur l'intensité, en lien avec les objectifs poursuivis par la séquence

1 – Concept de circulation : continuité du débit pour des éléments en série

Rappelons brièvement que ce concept de circulation n'est pas enseigné dans l'enseignement habituel, si ce n'est rapidement sous la forme d'une loi à savoir par cœur, trop souvent résumée par : « *l'intensité est partout la même* » porte ouverte à de nombreuses interprétations abusives, alors que la séquence y consacre un chapitre. Observons son respect au sein des deux populations sur le montage en série et celui en dérivation :

Tableau des élèves ayant acquis le concept de circulation

Montage Enseignement / Classe	Série 2°	Série 1°	Branche principale du montage en dérivation 2°	Branche principale du montage en dérivation 1°
Séquence	22 / 34 65 %	15 / 19 80 %	26 / 30 87 %	18 / 20 90 %
Habituel	20 / 39 51 %	23 / 35 37 %	13 / 34 38 %	23 / 37 62 %

La séquence semble avoir apporté une représentation correcte de ce concept à la majorité des élèves l'ayant suivie, même si par rapport à l'hypothèse de maîtrise des prérequis, (la circulation est l'un des prérequis au concept d'intensité), on n'est pas arrivé à l'objectif des 100 %. En conséquence, avant tout nouvel enseignement de l'électricité il conviendrait d'y revenir, simple rappel pour ceux qui le possèdent et occasion de remédiation pour les autres.

2 – Concept de système : interaction entre le générateur et son circuit extérieur

Ce concept n'est pas enseigné en tant que tel, dans l'enseignement habituel, si ce n'est par les enseignants qui prennent le temps de l'illustrer au travers des conséquences de la loi d'Ohm. Pour l'élève, cette loi se résume le plus souvent à un simple outil mathématique fort utile, sans lien avec le réel.

La séquence a illustré ce concept, sur le circuit série, avec l'analogie de la chaîne de vélo et l'a réinvesti sur des exemples. Observons, sur les deux exemples de circuit, le comportement des deux populations :

Tableau des élèves se représentant un circuit comme un système en interaction

Montage Enseignement	Classe	Série 2°	Série 1°	Dérivation 2°	Dérivation 1°
Séquence		8 / 34 24 %	6 / 19 32 %	13 / 30 43 %	8 / 20 40 %
Habituel		0 / 39 0 %	1 / 35 3 %	1 / 34 3 %	6 / 37 16 %

Au sein de la population ayant vécu la séquence, on observe un nombre d'élèves qui reste minoritaire imaginant une influence d'une modification du circuit sur le débit du générateur. Mais c'est un effet propre à l'enseignement de la séquence (quasi absent, avant l'option sciences expérimentales, de l'autre population). L'acquisition de ce concept nécessiterait d'y consacrer encore du temps à l'occasion d'un enseignement ultérieur de l'électricité.

3 – Propriétés spécifiques des deux concepts I et U

Tableau des élèves ayant mis en oeuvre les propriétés du concept d'intensité sur le montage en série ou en dérivation

Montage Enseignement	Classe	Série 2°	Série 1°	Dérivation 2°	Dérivation 1°
Séquence		22 / 34 65 %	6 réponses correctes + 3 avec I_g constant / 19 47 %	27 / 30 90 %	14 / 20 70 %
Habituel		3 / 39 8 %	1 correcte + 3 avec I_g constant / 35 11 %	12 / 34 35 %	16 / 37 43 %

Un des objectifs de la séquence était une construction progressive par attribution de propriétés des concepts d'intensité et de d.d.p. L'analyse permet de connaître les élèves ayant utilisé une loi physique pour répondre aux questions sur le montage en série (continuité du débit), de même pour le montage en dérivation (partage du débit au nœud) :

Dans le montage en série on avait observé (§ 1 – e – 2 –) une majorité d'élèves (51 %) ayant suivi l'enseignement habituel qui raisonnent à courant constant (ce qui ne nécessite la connaissance d'aucune propriété du concept d'intensité). De même dans le montage en dérivation (§ 1 – e – 3 –), en dehors des sans réponse, la plus forte proportion de leurs réponses est formée d'élèves raisonnant à courant constant ou n'utilisant que la loi d'Ohm, c'est à dire sans référence directe à une propriété du concept.

Le raisonnement à courant constant, étape vers le raisonnement systémique, était minoritaire en classe de seconde dans la population ayant appris avec la séquence. Par exemple, sur le montage en série c'était celui de 5 / 34 élèves, soit 15 %. Il s'est développé entre la classe de seconde et celle de première (6 / 19 = 32 %) et on observe conjointement une diminution relative du pourcentage de réponses faisant appel à une propriété de l'intensité : les progrès de ces élèves resteraient à consolider.

On observe toutefois un effet positif de la séquence : elle permet un an plus tard à une majorité d'élèves de mettre en oeuvre une propriété du concept pour répondre à une question sur l'intensité, ainsi qu'à quelques élèves ayant suivi un autre enseignement, seulement après le rattrapage qu'a pu constituer pour eux l'option.

1 – e – 4 - Question V₃, montages mixtes

Nous ne nous intéressons ici qu'aux réponses des élèves ayant suivi la séquence en classe de seconde.

Une immense majorité de réponses restent incomplètes et de nombreux questionnaires sans réponses. Nous allons observer de plus près les réponses recueillies : la réponse de la physique ne se trouvant que chez 5 élèves ayant suivi la séquence, nous allons rechercher les éléments de la réponse correcte mis en oeuvre pour connaître les étapes acquises.

– Eléments de la réponse correcte

α - respect de l'unicité du débit pour des dipôles en série

Tableau des éléments de circuit où la continuité du débit est respectée

Elément de circuit Réponse Classe / Année	Principal « en série » $i_{AB} = i_{AD}$		Principal en dérivation $i_{AB} = i_{CF} = i_{AF}$		Branche « série » $i_{BC} = i_{CD}$	
Loi	respectée	violée	respectée	violée	respectée	violée
1 ^o S	11 / 19 élèves	1	7 / 20 élèves	2	7 / 19 élèves	3
99 - 00	58 %	5 %	35 %	10 %	37 %	16 %
Conservation du débit	sur le circuit principal				sur la branche	
1 ^o S	18 / 21 réponses		18 / 39 élèves		7 / 10 réponses	
99 - 00	86 %		46 %		70 %	
Seconde	21 / 29 réponses		21 / 64 élèves		13 / 15 réponses	
98 - 99	72 %		33 %		87 %	

Remarques

1 - A propos de la première colonne : sur 11 réponses respectant la continuité du débit dans la branche principale d'un circuit mixte, parmi les élèves ayant suivi la séquence, une seule ne contient que cette information, les autres étant des réponses complètes.

2 – A propos des « sans réponse » d'élèves de la séquence :

- sujet partant d'un montage en série : question sur le circuit principal : 5 / 19 élèves, soit 26 % et question sur la branche : 6 / 19, soit 32 %.

- sujet partant d'un montage en dérivation : question sur la branche principale : 7 / 20 élèves, soit 35 %.

3 - On observe des fluctuations d'un montage à l'autre, mais globalement les résultats sont proches.

β - respect de la loi des noeuds

Loi	respectée	violée	Bilan du respect
Classe			
1° S	10 / 39 dont 3 partage =	3	10 / 18 réponses 55 %
Seconde	18 / 64 dont 4 partage =	22	18 / 43 réponses 44 %

Rappel des origines possibles du viol de cette loi :

- le raisonnement à **courant constant** en est responsable pour 2 élèves de la séquence, pour le montage $(R1 + R2) // R3$;

- pour l'autre montage deux élèves de la séquence ont repris leurs réponses à la question 2 ;

- des composants parcourus par une intensité nulle : les fils (2 élèves) ou le générateur (un élève).

En conclusion, on peut remarquer qu'une majorité d'élèves ayant suivi la séquence semblent habitués à réinvestir la loi des noeuds sur un montage mixte.

γ - Elèves ayant éprouvé le besoin de calculer R_e

En fin de première ce sont 6 élèves ayant suivi la séquence (comme en seconde) qui ont recherché R_e . Le calcul est exact pour trois élèves, ce qui leur permet de fournir la réponse correcte.

1 – e – 5 – Analyse par rapport aux objectifs de la séquence

– Propriétés du concept d'intensité

- Concept de circulation : débit constant traversant des dipôles montés en série

Nous venons d'observer les réponses fournies par la population ayant appris avec la séquence. Cette loi est respectée, à cette dernière question numérique par :

- 18 / 21 élèves sur le circuit principal, soit 86 % des réponses et sur la branche par
- 7 / 10 élèves, soit 70 % des réponses

Cette loi est violée par exemple par l'élève qui a répondu par un débit nul dans les fils, à savoir $i_{AB} = 0$. Rappelons que cette réponse est le reflet de la confusion des propriétés des deux concepts intensité et d.d.p., sans doute fruit d'une absence de représentation, au moins de l'intensité comme débit de la circulation.

Elle l'est également par 3 élèves appartenant à la séquence qui ont prévu un débit nul traversant le générateur, c'est à dire $i_{AD} = 0$, ou $i_{AF} = 0$.

- **Circulation au niveau d'un nœud** : la loi des noeuds est respectée par 55 % des réponses des élèves ayant suivi l'enseignement de la séquence.

– Concept de circuit : interaction entre le circuit et le générateur

Ils sont 6 élèves ayant suivi l'enseignement de la séquence à prévoir une évolution de l'intensité à travers le générateur lors de l'évolution d'un circuit à deux récepteurs (en série ou en dérivation) en un circuit mixte à 3 récepteurs, ce qui représente 6 / 18 réponses d'élèves de la séquence, soit 33 % des réponses et 6 / 8 des réponses complètes, soit 75 %.

En résumé, l'étude de circuits mixtes illustre les limites atteintes par les élèves :

Tableau comparatif des éléments de réponse fournis entre la classe de seconde et celle de première

Classe	Réponse Année	Complète	Complète Correcte	Sans réponse
1° S	99 – 00	8 / 39 élèves 21 %	5 / 39 13 %	11 / 39 28 %
Seconde	98 – 99	8 / 62 13 %	5 / 62 8 %	30 / 62 59 %

Il est à préciser que les élèves « sans réponse » en classe de première ont été vus en entretien où ils ont tous déclaré « je ne sais pas. ». Il y a $15 + 5 = 20 / 39$ élèves de la séquence, soit 51 % des réponses limitées à prévoir une continuité du débit du générateur, c'est à dire plus de la moitié des élèves, déroutés par le circuit mixte, la moitié d'entre eux ayant montré à la question précédente qu'ils connaissent les lois sur les montages plus simples. Si on compare aux questions qualitatives, le nombre et la qualité des réponses sont moindres.

Conclusion

Les effets conjugués de la sélection entre la classe de seconde et celle de première et l'apport de l'option sciences expérimentales en 1^{er}S semble avoir permis au moins une **grande stabilité des acquis** chez les élèves ayant suivi la séquence

Il apparaît une **lacune** : l'élève n'a pas réalisé l'intérêt de la **résistance équivalente**, ce qui se remarque par :

- le faible nombre d'élèves qui éprouve le besoin de la rechercher,
- et au contraire ceux, qui l'ayant trouvée, ne s'en servent pas.

Ces observations conduisent à émettre deux hypothèses, pour une poursuite de l'enseignement dispensé : un nécessaire travail de réinvestissement des lois découvertes sur les circuits simples, sur des circuits ayant de plus en plus de dipôles passifs aux branchements variés, travail qualitatif, mais aussi quantitatif pour faire naître le besoin de la résistance équivalente, qu'elle devienne un outil aussi indispensable et familier à l'élève que la loi d'Ohm

2 – Concept de D.D.P.

2 – a – Réponses aux questions qualitatives, portant sur le circuit simple

(Question I, annexe VI. 5-10)

Dès la première question, la lecture des réponses fait apparaître une moins grande familiarité des élèves avec ce concept. Parmi les élèves de la séquence tous répondent et justifient mais :

- un élève utilise des termes en lien avec la circulation, et sa réponse évoque un raisonnement séquentiel : « $U_{AD} > U_{BC}$ R freine le passage des électrons »
- et un autre emploie les mêmes termes qu'à la question portant sur l'intensité : « la tension est la même dans un circuit série ».

Pour eux, les concepts ne semblent pas distincts.

Tableau des réponses qualitatives portant sur la d.d.p. du circuit simple :
comparaison avec les réponses fournies par les mêmes élèves en fin de seconde

Réponse	Exacte 98-99 2 ^e	Exacte 99-00 1 ^e	Loi I 98-99 2 ^e	Loi I 99-00 1 ^e	? 98-99 2 ^e	? 99-00 1 ^e
Année Classe						
Enseignement						
Séquence	44 / 62 70,9 %	37 / 39 94,9 %	13 / 62 21 %	2 / 39 5,13 %	5 / 62 8 %	0
Autre enseignement	16 / 65 24,6 %	26 / 41 63,4 %	28 / 65 43 %	5 / 41 12,2 %	18 / 65 27,7 %	9 / 41 22 %

Sur cette première question qualitative portant sur le circuit simple on observe entre la classe de seconde et celle de première une régression du nombre des réponses en terme d'intensité à une question portant sur la différence de potentiel, et une élévation du taux de réponses correctes. L'origine de ces progrès relatifs en pourcentage (voir analyse précédente) est à rechercher dans les effets combinés de la sélection opérée lors du passage en première et du travail effectué au cours de l'option en 1^{er}S.

2 – a – 1 – Observations en lien avec les objectifs de la séquence

Un des buts poursuivis est la différenciation de la notion usuelle de courant en deux concepts distincts, aux propriétés propres. Aussi peut-on regarder s'il y a une différence au niveau du langage utilisé, puis au niveau des propriétés :

– Vocabulaire employé pour justifier les réponses à la question I

On observe le vocabulaire sur les deux parties de la question, c'est à dire portant sur les deux concepts d'intensité et de différence de potentiel, employé par les élèves de 1^oS :

Vocabulaire Enseignement	L'intensité qui traverse et / ou la d.d.p. aux bornes	Acceptable ?	Intensité aux bornes, d.d.p. non justifiée ou ss.rép.	confusion
Séquence	19 / 39 48,7 %	18 / 39 46,15 %	1 / 39	1 / 39
Autre	29 / 91 31,9 %	34 / 91 37,4 %	19 / 91 20,9 %	9 / 91 9,9 %

Nous avons distingué :

- dans la 1^o colonne, à partir de la gauche, ceux qui justifient à partir d'une démarche proche de la physique, par exemple à partir des lois concernant l'intensité à la partie intensité, et des propriétés de la d.d.p. à la partie d.d.p. dans un montage en série, avec le vocabulaire du physicien ;

- dans la 2^o colonne, ceux qui fournissent une réponse acceptable avec un vocabulaire moins rigoureux, tel cet élève : « dans un circuit série l'intensité est la même ; dans un circuit série la d.d.p. se partage entre les différents dipôles, et comme il n'y a qu'un dipôle la d.d.p. de BC est la même que celle de AD » ;

- dans la 3^o colonne, ceux qui n'ont pas justifié, ou pas répondu à la partie d.d.p. ;

- dans la 4^o colonne, ceux qui utilisent le même vocabulaire pour les deux concepts, par exemple cet élève, qui parlant de la différence de potentiel déclare : « dans un circuit série l'intensité est la même en tout point », puis à la partie d.d.p. une justification sans lien avec la question, telle « la résistance freine le passage des électrons. »

Les deux premières colonnes correspondent donc à des élèves qui ont un vocabulaire différent pour chaque concept, mais plus ou moins rigoureux, alors que les suivantes correspondent à des élèves ne différenciant pas, au moins par le vocabulaire les deux concepts dont le physicien a besoin pour décrire le fonctionnement d'un circuit.

Le vocabulaire utilisé apparaît différencié chez 95 % des élèves ayant suivi la séquence, mais vraiment rigoureux seulement pour la moitié d'entre eux. Un seul élève ayant suivi la séquence emploie un langage inapproprié : « la d.d.p. aux bornes du générateur est égale à la somme des d.d.p. parcourant le circuit série, R_1 est l'unique composant donc $U_{AD} = U_{BC}$ »

L'approche du concept de d.d.p. par un vocabulaire qui lui est propre semble encore acquis, un an après, par la population ayant suivi la séquence à une exception près.

– Différenciation des propriétés

On peut distinguer des élèves ayant :

- 1 - clairement énoncé ou utilisé une **propriété de la d.d.p.** Certains :
 - ont mené l'analyse à son terme et sont arrivés à la prévision de la physique,
 - n'ont pas tenu compte des données et aboutissent à une autre prévision ;
- 2 - clairement utilisé une **propriété de l'intensité** et fournissent la prévision de la physique ou une autre ;
- 3 - fourni des **justifications vagues** dont l'imprécision cache peut-être une absence de représentation, ou de différenciation des deux concepts, donc à classer avec les sans justification.

Justification Enseignement	$U_g = \Sigma U \text{ dip.}$ bien exploitée	$U_g = \Sigma U \text{ dip.}$ mal exploitée	Mal justifié absence de loi	Loi I > ou =	> non justifié
Séquence	32 / 39 82 %	1 2,5 %	5 12,8 %	1 2,5 %	0
Autre	34 / 72 47,2 %	8 / 72 11,1 %	15 / 72 20,8 %	7 / 72 9,7 %	6 / 72 8,3 %

Ce tableau montre des situations plus finement analysées. Pour répondre à cette question simple, 82 % de la population qui a suivi la séquence énonce la loi physique et l'exploite. Ainsi, 80 % d'entre eux font preuve qu'ils ont acquis, sur cet exemple simple, une méthode d'approche d'une question de physique, ce qui est un aspect fondamental de l'enseignement des sciences. On peut supposer que la rigueur de la démarche les aidera à être proportionnellement plus nombreux à prévoir correctement dans une situation un peu plus compliquée.

2 – a – 2 - Conclusions

Sur cette question simple une majorité d'élèves ayant suivi la séquence, en classe de première continuent à :

- différencier les concepts, en employant un vocabulaire approprié et en leur attribuant des propriétés distinctes ;
- fournir des réponses cohérentes, ne contenant qu'exceptionnellement une discontinuité du débit ;
- s'appuyer sur une loi pour fournir une réponse à une question de physique, en prenant en compte tous les éléments de la situation, c'est à dire avoir acquis une démarche d'analyse rigoureuse.

Ces premières observations ont été faites lors de l'analyse du circuit le plus simple et le plus usuel. Il sera intéressant dans la suite de l'étude des réponses à ce questionnaire d'aller voir si les mêmes qualités et les mêmes aptitudes se retrouvent.

2 – b – Question qualitative où la valeur de la résistance change

(Question II, annexe VI. 6-11))

2 – b – 1 – Tableau des réponses recueillies en fin de seconde, puis

en fin de 1^oS

Réponse Année Classe	Exacte 98-99 2 ^o	Exacte 99-00 1 ^o	Fausse 98-99 2 ^o	Fausse 99-00 1 ^o
Enseignement				
Séquence	34 / 62 54,8 %	28 / 39 71,8 %	25 / 62 40,3 %	11 / 39 28,2 %
Autre enseignement	19 / 66 28,8 %	14 / 41 34,2 %	35 / 66 53 %	24 / 41 58,5 %

On observe à la fois :

- une élévation du pourcentage de réponses justes, mais
- une qualité des justifications dans la population de la séquence qui baisse : par exemple, ils ne sont plus que quatre à considérer explicitement l'ensemble du circuit.

Tableau des justifications ayant conduit les élèves de la séquence à la réponse correcte

Justification Classe	Ensemble du circuit	Générateur seul	Montage série	Loi d'Ohm	Affirme R sans effet	Sans
Seconde 34 réponses correctes	8	11	2	6	3+3	1
Première 28 réponses correctes	4	2	6	5	11	0

Les analyses des élèves parlant du circuit, du générateur ou du montage en série représentent 21 / 34 des réponses correctes (62 %) en seconde et 12 / 28 (43 %) en fin de 1^o.

La loi d'Ohm, qui est ici, pour le physicien, dépourvue de pouvoir prédictif, a été utilisée par 18 % des élèves des deux niveaux ayant fourni la réponse correcte.

Les élèves qui se contentent d'affirmer une réponse liée à leur représentation d'une propriété soit de la résistance, soit de la d.d.p. étaient 6 / 34 (18 %) en seconde, et sont 11 / 28 (39 %) en première.

Tous ces exemples illustrent une qualité des justifications, à cette question, qui a diminué entre la classe de seconde et celle de première.

2 - b - 2 - Observations en lien avec les hypothèses de la séquence

- Intérêt de l'approche qualitative

L'approche qualitative peut paraître ici particulièrement intéressante dans la mesure où la loi d'Ohm est inutile. De plus les trois concepts mis en relation dans cette loi sont rarement considérés par l'élève comme trois variables potentielles : ils en fixent une, le plus souvent l'intensité, en lien avec une représentation à courant constant, ou à débit constant du générateur (représentation locale ou séquentielle). Ils « oublient » l'énoncé, raisonnent sur les deux autres grandeurs, considérées comme étant les seules susceptibles de varier, même parfois avec des erreurs, car l'usage de la proportionnalité n'est pas maîtrisée par tous.

Quels sont les éléments pris en compte par les élèves de la séquence n'utilisant pas la loi d'Ohm ? Il se trouve :

- six élèves (aux réponses correctes) parlant d'un **générateur possédant une d.d.p. constante**. Parmi eux se trouvent

- des élèves **analysant le montage** : c'est un circuit série, un seul dipôle ... certains complètent avec **une loi**, et fournissent une réponse correcte, *alors que d'autres ne font pas appel aux lois, seulement à leur représentation et fournissent une autre prévision*. Exemples :

« R_2 dans un circuit série et seul dipôle, donc sa d.d.p. est la même que celle du générateur, le générateur a une A.S. donc U'_{BC} ne varie pas. »

« car il y a plusieurs dipôles déjà présents dans le circuit série, et le second demande une plus grande différence de potentiel que le premier. »

Cette analyse conduit 9 / 11 élèves à la réponse exacte.

- des élèves aux raisonnements centrés sur la **variation de la valeur de la résistance**, avec différents raisonnements :

- soit **U et R varient ensemble**, ce qui conduit dix élèves ayant suivi la séquence à une prévision fautive ;
- soit, comme l'écrit un élève de la séquence : « R_2 est un frein plus petit au passage du courant donc la d.d.p. augmente. »
- soit **R agit sur l'intensité mais pas sur la tension**, ce qui conduit 5 élèves à une prévision exacte.

Quelle différence existe-t-il entre ces trois portes d'entrée ?

- les élèves qui ont assimilé la caractéristique du **générateur** peuvent s'arrêter là, la suite du raisonnement, même resté implicite, ils fournissent la réponse correcte ; ou continuer avec la loi d'additivité de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série, soit explicitée, soit implicite ;

- les élèves qui analysent le **circuit** peuvent le faire avec beaucoup de rigueur et ils parlent aussi du générateur, ou le générateur peut rester implicite, ou l'analyse être très résumée, le reste étant sans doute pris en compte au vu de la prévision ;

- l'analyse centrée sur la seule **résistance** conduit un maximum d'élèves à des prévisions fausses puisqu'au total on ne trouve que 5 / 16 réponses exactes.

Les élèves ayant fourni une justification prenant en compte le générateur et le circuit, c'est l'expression, plus ou moins résumée, d'un raisonnement proche de la physique. Au contraire, les élèves au regard focalisé sur la résistance expriment souvent un lien direct entre l'évolution de la résistance et celle de la d.d.p. à ses bornes : si pour 5 élèves R agit sur l'intensité, pas sur la d.d.p., il y en a 7 pour penser que la résistance R du circuit et la d.d.p. du générateur varient dans le même sens tandis que 3 autres pensent que R et U varient en sens contraire (lorsque la résistance du circuit s'élève, la d.d.p. du générateur diminuerait), ce qui serait une propriété proche de celle de l'intensité ... et peut-être une globalisation des concepts ?

Ces **approches qualitatives** conduisent la majorité des élèves qui les emprunte à une réponse correcte, surtout lorsque l'analyse passe par une loi physique (ici la loi d'additivité des tensions) : ces élèves sont capables

de construire une **démarche scientifique pour répondre à une question de physique**. Ce sont 11 / 39 élèves de la séquence dont 9 / 11 réponses correctes.

Au contraire, les élèves faisant appel à la **loi d'Ohm**, se réfugiant derrière des lettres (vides de sens ?), sont 10 / 39 élèves de la séquence dont 5 / 10 prévisions exactes et autant de **réponses fausses** !

Un an plus tard, ce sont les élèves de la séquence qui privilégient l'approche d'une question par une **analyse qualitative du circuit** (à l'approche mathématique par la loi d'Ohm) qui fournissent la majorité des réponses correctes (23 / 28, soit 82 %). On peut penser que cette approche soit le reflet d'une représentation plus sûre. Il semble que la séquence ait pu apporter un peu de sens au concept, par une approche répétée en faisant évoluer le circuit : changement de générateur, de dipôle passif, de branchements, aussi peut-être en retrouvera-t-on des effets aux questions suivantes... On peut noter qu'elle reste à travailler, puisqu'elle n'est empruntée que par une partie de la population.

Voici, résumé dans un tableau, les élèves ayant fourni des réponses correctes à l'ensemble de la question II (circuit évolutif) :

Tableau des élèves ayant donné des prévisions compatibles avec la physique, intensité et d.d.p., sur le circuit simple évolutif :

Enseignement	Année Classe	98 - 99 2°	99 - 00 1°
Séquence		30 / 62 48 %	26 / 36 67 %
Autre		4 / 66 6 %	16 / 72 22 %

Conclusion à l'ensemble de la question II :

Les acquis de la séquence semblent stables.

Le peu de temps consacré à l'électrocinétique au cours de l'option sciences expérimentales apparaît avoir été une occasion de remédiation pour tous les élèves. Elle a fourni l'opportunité, saisie par 12 élèves d'accéder aux prévisions de la physique, sur le circuit simple. Même si les premiers progrès sont les plus faciles à faire, ce type d'enseignement paraît d'autant plus efficace qu'il s'adresse à des élèves sélectionnés et motivés, ayant soit de comprendre : la démarche hypothético-déductive les met à la recherche d'une réponse. Elle permet de rapides progrès, lesquels se retrouvent en fin d'année.

2 - c - Question qualitative, portant sur le circuit série

(Question III, annexe VI. 7)

2 - c - 1 - Tableau récapitulatif des réponses des élèves de la séquence

Tableau des réponses concernant la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série
Elèves de la séquence

Réponse Classe	De la physique $U_{bc} < U_{af}$ $U_{bc} > U_{de}$	« collège » $U_{bc} < U_{af}$ $U_{bc} = U_{de}$	Autre * $U_{bc} \geq U_{af}$ $U_{bc} > U_{de}$	Loi 1 $U_{bc} = U_{de} = U_{af}$	Sans réponse
Seconde	17 / 30 57 %	3 / 30 10 %	3 / 30 23 %	4 / 30 10 %	3 / 30 10 %
Première	11 / 20 55 %	7 35 %	1 5 %	0 0 %	0 1 incomplète

A titre indicatif, nous avons inscrit les réponses recueillies en seconde, tout en se souvenant que ce ne sont sûrement pas exactement les mêmes élèves qui ont répondu à cette question en classe de seconde, puis en classe de première : quand un élève réfléchit sur le montage en série, son voisin dispose de celui en dérivation pour éviter tout effet de voisinage.

Les réponses en fin de première sont plus nombreuses et majoritairement en termes de d.d.p. mais avec 39 % de partage égal entre les dipôles montés en série (15 % des réponses en termes de d.d.p. en seconde).

Exemples de justifications aux réponses *autres trouvées en classe de seconde :

« La résistance dans le nouveau montage est supérieure à celle du premier
Le courant passant dans R_1 traverse la première résistance, alors que le courant passant dans R_2 traverse la deuxième résistance » ; ou
« L'intensité est la même aux bornes du générateur et aux bornes de R_1 , donc le courant est aussi le même ; L'intensité est plus grande aux bornes de R_1 qu'aux bornes de R_2 , comme $U = RI$, le courant est plus grand à R_1 . »

Elles font penser à des réponses séquentielles portant sur le concept d'intensité.

2 - c - 2 - Analyse en lien avec les objectifs de la séquence

- Différenciation des concepts

Seul un élève de la séquence a raisonné comme en réponse à une question portant sur l'intensité avec un raisonnement séquentiel :

« On applique la relation $U = R \times I$ aux dipôles R_1 et R_2 . En R_1 la résistance est plus importante qu'en R_2 mais l'intensité est plus importante en R_2 qu'en R_1 » ce qui lui permet de justifier une prévision correcte !

- Acquisition de propriétés du concept

La nature des justifications, comme leur absence éventuelle, permet une approche de la représentation du concept :

1 Comparaison U_{bc} / U_{af}

Tableau des justifications fournies pour la comparaison U_{bc} / U_{af}
par les élèves de la séquence, en fin de 1^{er}S

Justification	Loi rédigée	Relation mathématique	Loi Ohm	Qualitatif $U_g >$
Séquence 20 élèves	14 / 20 70 %	4 20 %	1 5 %	1 5 %

Analyse

Les justifications des élèves de la séquence montrent :

- une majorité d'élèves qui s'appuient sur une loi rédigée (14 élèves) et
- 4 sur une relation mathématique ;
- un élève qui fournit une approche qualitative du générateur comme ayant la plus forte d.d.p. ($U_g >$), ce qui est également le reflet d'une bonne représentation du concept ;
- une seule explication difficile à interpréter, puisque limitée à « loi d'Ohm ».

2 Comparaison U_{bc} / U_{de} : la justification complète de la réponse correcte fait appel à trois éléments : la loi d'Ohm, l'unicité du débit en série et la différence de valeur des résistances.

Ces trois éléments ont été pris en compte explicitement par 3 élèves de la séquence, par exemple :

« $U = R \times I$ donc si $R_2 < R_1$ et I étant la même, alors $U_{bc} > U_{de}$. »

Autres exemples de justifications de la réponse correcte, telle cette approche qualitative intéressante :

« R_1 offre un frein plus grand au passage du courant, donc la d.d.p. qui la traverse sera plus grande. »

ce qui peut être rapproché de cette autre justification, au verbe « traverser » près,
 « plus la valeur de la résistance est grande, plus la tension est importante. », ou encore
 « $R_1 > R_2$ donc d.d.p. plus élevée aux bornes de R_1 . »

Souvent la continuité du débit est sous entendue :

- un élève écrit la loi d'Ohm indicée, sauf pour i , tandis que
- 2 élèves n'écrivent que la loi d'Ohm et $R_2 < R_1$, la même intensité n'apparaît pas, et
- un élève se contente d'écrire $R_2 < R_1$.

Ces approches, moins précises, conduisent malgré tout ces élèves à la prévision correcte.

La prévision peut être juste affirmée, et parfois même généralisée (7 élèves) : « en série U dipôle = U générateur / n dipôle. »

Il reste les absences de représentation du concept : un élève sans réponse, un hors sujet et une réponse séquentielle.

2 - d - Question qualitative, portant sur le circuit avec dérivation

(Question III, annexe VI. 12)

La lecture de l'analyse du questionnaire passé en seconde donne une idée des réponses possibles :

- celle de la physique $U_{BC} = U_{AF} = U_{DE}$
ces dipôles ayant leurs bornes reliées deux à deux possèdent la même d.d.p.
- l'utilisation de propriétés de l'intensité, à un nœud :
« $U_{AF} = U_1 + U_2$ donc $U_{BC} < U_{AF}$. »
- Puis soit la loi de la d.d.p., soit l'idée d'un partage égal au nœud conduit à la même prévision : $U_{BC} = U_{DE}$
« en parallèle $U_1 = U_2 = U_3 = \dots$. »

En fait, à la lecture des justifications, qui pour ces élèves de 1° S sont relativement précises, on constate que ce n'est pas si simple. A deux exceptions près, dont un élève qui parle de courant qui circule, la prévision de la physique découle de l'application correcte de la propriété de la d.d.p. pour des dipôles en dérivation. Mais les autres prévisions sont plus variées avec des justifications qui peuvent n'utiliser :

- que des propriétés de l'intensité ;
- que des lois de la d.d.p. ;
- parfois une loi de l'intensité I à la première question, puis une loi d.d.p. U à la deuxième.

A titre indicatif nous pouvons donner un tableau comparatif des réponses recueillies en seconde et en première, sachant que ce ne sont sûrement pas exactement les mêmes élèves qui ont eu ce sujet :

2 - d - 1 - Tableau des réponses des élèves de la séquence

Question qualitative, circuit avec dérivation

Justification	Loi U correcte	Erreur sur le concept U	Mélange des propriétés de 2 concepts	Loi I ou sa représentation	Sans réponse
Classe					
Seconde	26 / 64 41 %	0	0	26 / 64 41 %	12 / 64 18 %
Première	13 / 19 68 %	3 / 19 16 %	1 / 19 5 %	2 / 19 10,5 %	0

Les réponses en fin de première étant, comme pour le montage en série, plus nombreuses et majoritairement correctes, on peut penser que les élèves de la séquence ont conservé, pour l'essentiel, les acquis de seconde.

2 - d - 2 - Analyse en lien avec les objectifs de la séquence

- Différenciation des concepts et acquisition de propriétés

Le tableau précédent est un bon outil d'observation :

68 % des élèves ayant suivi la séquence ont mis en oeuvre le concept de d.d.p. avec sa propriété pour des dipôles montés en dérivation ;

à l'inverse, 10,5 % ont utilisé une loi de l'intensité pour répondre à une question en terme de d.d.p.

Les élèves qui répondent avec des erreurs, soit sur la représentation de la d.d.p., soit en utilisant tantôt une loi de l'intensité, tantôt une loi de la d.d.p. se trouvent dans une phase de leur apprentissage.

Un an plus tard, on observe un progrès du taux d'élèves ayant acquis le concept de d.d.p., pour la population ayant suivi la séquence : ils sont une fois et demi plus nombreux à fournir une réponse correcte à cette question sur un montage avec dérivation et quatre fois moins nombreux à se servir d'une loi de l'intensité.

- Rigueur de la démarche utilisée pour répondre

La justification de la réponse correcte est toujours qualitative mais le plus souvent imprécise (certains énoncés pourraient conduire leurs auteurs à des prévisions fausses sur un circuit mixte.):

« dans un circuit en dérivation, la d.d.p. est partout la même. » (2 élèves)

« dans un circuit en dérivation les tensions des différents dipôles est la même. » (2 élèves)

« dans un montage en dérivation, la d.d.p. est la même aux bornes de différents dipôles que la d.d.p. aux bornes du générateur. » (1 élève)

« dans un circuit en dérivation, même tension aux bornes de chaque branche. » (2 élèves)

Ces justifications imprécises représentent 10 / 13 réponses correctes de la séquence.

Au contraire, **trois élèves** de la séquence ont éprouvé le besoin de préciser davantage les particularités du circuit :

« BC est le seul dipôle » ; « la tension aux bornes des fils est nulle » ; « R_1 et R_2 sont les seuls dipôles dans leur branche »

- Approche qualitative

L'approche qualitative était la seule, ici, qui puisse conduire à une réponse correcte, la loi d'Ohm n'étant d'aucune utilité. La justification qualitative conduit une majorité d'élèves qui l'utilisent à la réponse correcte (sauf 2 élèves de la séquence qui utilisent l'image du frein).

Conclusions

Sur ces questions portant sur la d.d.p. aux bornes d'éléments d'un circuit comportant un générateur et deux récepteurs montés en série ou en dérivation on a pu observer une influence de certaines hypothèses de la séquence à la lumière des justifications fournies :

- la différenciation des concepts I et U ;
- l'attribution de ses propriétés au concept U, par exemple en dérivation par 68 % des élèves de la séquence avec
- une justification qui peut être rigoureuse et qui montre que l'élève connaît les limites de validité de la loi (3 / 13 réponses correctes en dérivation) ;
- une approche qualitative efficace surtout lorsque la loi d'Ohm n'est d'aucun secours.

Un an après enseignement, différenciation des concepts et attribution de propriétés spécifiques, approche qualitative et justifications rigoureuses continuent de caractériser nombre de réponses fournies par la population ayant suivi la séquence. Les réponses recueillies peuvent justifier le choix de l'introduction indépendante des différents concepts ainsi que le travail qualitatif, mais elles montrent également que ce travail aurait besoin d'être poursuivi : des élèves sont encore en phase intermédiaire d'apprentissage.

2 – e – Réponses numériques (Questions V, annexe VI. 9-14)

2 – e – 1 – Question V_1 des deux questionnaires

Ayant l'intensité à la sortie d'une alimentation stabilisée et la valeur de la résistance du dipôle traversé, on s'intéresse à la d.d.p. aux bornes des différents éléments du circuit. Une réponse compatible avec celle de la physique à cette question nécessitait de mettre en oeuvre un certain nombre de connaissances :

- la loi d'Ohm pour trouver la valeur de la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique connaissant sa résistance et l'intensité qui le traverse ;
- les lois de la d.d.p. le long d'un circuit série ;
- la valeur négligeable de la d.d.p. aux bornes d'un fil.

Nous allons inscrire, dans un même tableau, les réponses recueillies en fin de seconde et en fin de première pour les élèves ayant suivi la séquence :

Tableau des réponses numériques sur le circuit simple
fournies par les élèves de la séquence en fin de seconde, puis en fin de 1^{er}S

Réponse Classe	Correcte	Loi U Autre réponse (erreur d'unité)	Loi I U = Cte	Autre réponse	Sans réponse
Seconde	44 / 62	9	7	1	1
62 élèves	71 %	14,5 %	11 %	1,6 %	1,6 %
Première	30 / 39	0	7 / 39	1	1
39 élèves	77 %		18 %	2,5 %	2,5 %

En classe de première S, les erreurs d'unités dans l'application de la loi d'Ohm ont disparu (effet de la sélection ?), mais on peut se demander si certains élèves, à la réponse correcte en seconde, n'ont pas répondu en première U = constante (loi de l'intensité) ?

2 – e – 2 – Question V₂ , avec dipôles montés en série

La réponse de la physique donnant la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série passe par des étapes de calcul :

- celui de la résistance équivalente ;
- puis l'utilisation de la loi d'Ohm pour trouver l'intensité dans la boucle : $I = U_{AD} / R_e$;
- puis de nouveau la loi d'Ohm aux bornes de chacun des dipôles : $U_{BC} = R_1.I$ et $U_{CD} = R_e.I$

En seconde peu d'élèves s'étaient engagés dans une telle démarche. Ils avaient privilégié des réponses, ayant pour eux le mérite d'éviter ce labyrinthe de calculs, telles :

- un partage égal entre les dipôles, représentation bâtie au collège sur la situation particulière de dipôles identiques, abusivement généralisée ;
- une représentation d'un générateur à débit constant, avec la loi d'Ohm, ou encore
- la représentation d'une d.d.p. constante le long du circuit.

Tableau des réponses numériques sur le circuit série
fournies par les élèves de la séquence en fin de seconde, puis en fin de 1^{er}S

*« Loi collège » avec partage égal

Réponse Classe	Correcte	Loi U : autre réponse,	Loi U avec Ig = Cte 4V-6V	Loi U avec Ig = Cte 4V-2V	Loi I U = Cte	Autres réponses	Sans réponse
Seconde	6 / 32	1	10	3 (partage égal)	3	4	5
32 élèves	19 %	3 %	31 %	9 %	9 %	12 %	incomplètes 16 %
Première	4 / 19	2 *	6	3	1	0	3
19 élèves	21 %	10 %	32 %	16 %	5 %		16 %

Ces observations montrent peu de différence dans les réponses de la population ayant suivi la séquence entre les deux passages du questionnaire : autour de 60 à 80 % de réponses en termes de d.d.p. et seulement 20 % de réponses correctes.

2 – e – 3 – Question V₂ , avec dipôles montés en dérivation

Cette question est d'un abord plus facile, ne demandant de mettre en oeuvre que la propriété des dipôles montés en dérivation, sans calcul : leurs bornes étant reliées elles se trouvent au même potentiel. Ces dipôles étant directement reliés au générateur, cette différence de potentiel est celle qui existe aux bornes du générateur. De plus, la loi est compatible avec celle apprise au collège...

Tableau des réponses numériques sur le circuit avec une dérivation

fournies par les élèves de la séquence en fin de seconde, puis en fin de 1^{er}S

Réponse Classe	Correcte	Loi U avec Ig = Cte	Ig = Cte Loi Ohm	Ig = Cte Loi I Loi des nœuds	Autre réponse	Sans réponse Réponse incomplète Ug = Cte
Seconde	20 / 30	2	1	2	1	3 + 1
30 élèves	67 %	7 %	3 %	7 %	3 %	13 %
Première	15 / 20	2	1	2	0	0
20 élèves	75 %	10 %	5 %	10 %		

La population ayant suivi la séquence se sert majoritairement de la propriété de la d.d.p. pour des dipôles en dérivation et la réponse est correcte pour la plupart d'entre eux. Cette question, à l'analyse rapide, qui ne demande aucun calcul (contrairement à ce qui se passe sur le montage en série), permet toujours à un plus grand nombre d'élèves de fournir la réponse correcte.

Un an après enseignement, cette propriété de la d.d.p. semble toujours acquise par la majorité de la population ayant suivi la séquence.

2 – e – 4 - Question V₃ avec des circuits mixtes

Neuf élèves sur 39 (23 %) n'ont fourni aucun élément de réponse : nous les avons rencontrés en entretien : ils étaient réellement dépourvus de moyens de répondre. On peut raisonnablement émettre l'hypothèse que l'absence de réponse est en lien étroit soit :

- avec des absences de représentations, soit peut-être
- avec l'emploi simultané de lois physiques et de représentations personnelles aboutissant à des résultats jugés incompatibles. (remarqué sur quelques questionnaires)

Une majorité d'élèves n'a fourni que quelques éléments de réponse :

α - Eléments de la réponse correcte :

1 – des élèves ont fourni un seul élément de réponse qui exprime la connaissance d'une propriété de la d.d.p. aux bornes d'un dipôle particulier, tel le générateur pour un élève ($U_{AF} = 12 \text{ V}$) ou le fil pour un autre ($U_{AB} = 0 \text{ V}$).

2 – des élèves ont fourni deux éléments de réponse qui sont les propriétés précédentes, accessibles sans calcul, écrites par deux élèves de la séquence : $U_{AF} = 12 \text{ V}$ et $U_{AB} = 0 \text{ V}$.

β - Propriétés de la d.d.p. aux bornes de dipôles particuliers

1 - le générateur

Le tableau qui suit permet de repérer :

- les élèves qui ont respecté la propriété de l'alimentation stabilisée, à savoir une d.d.p. constante à ses bornes ;
- les élèves qui attribuent des propriétés différentes aux deux concepts I et U
 - o U constant et I variant, réponse correcte
 - o U variant et I constant, en accord avec une représentation initiale du générateur à débit constant et un début de différenciation des concepts ;
- les élèves qui leur attribuent les mêmes propriétés aux deux concepts I et U
 - o le plus souvent, tous les deux constants
 - o tous les deux variant.

Ayant constaté sur les questions précédentes une forte parenté entre les réponses de seconde et celles de première, nous n'indiquerons que les réponses recueillies en 1^oS, en notant :

- sujet 1 la question portant sur le montage R_1 en série avec R_2 , l'ensemble aux bornes de R_3 et du générateur ;
- sujet 2 la question portant sur le montage R_1 en dérivation avec R_2 , dérivation montée en série avec R_3 et le générateur.

Tableau récapitulatif des représentations du générateur
(tableau établi à partir des réponses numériques aux deux dernières questions portant sur la d.d.p. à ses bornes et l'intensité qui le traverse) :

Questionnaire Question	1 2	2 2	1 3	2 3
Représentation du générateur :				
Ug Cte Ig varie	5 / 19 26 %	6 / 20 30 %	5 / 19 26 %	3 / 20 15 %
Ug Cte Ig varie (bilan)	11 / 39 28 %		8 / 39 21 %	
Ug varie Ig Cte	4 / 19 21 %	4 / 20 20 %	3 / 19 16 %	2 / 20 10 %
Ug varie Ig Cte (bilan)	8 / 39 21 %		5 / 39 13 %	
Ug Cte Ig Cte	4 / 19 21 %	9 / 20 45 %	4 / 19 21 %	5 / 20 25 %
Ug Cte Ig Cte (bilan)	13 / 39 33 %		9 / 39 23 %	
Ug varie Ig varie	4 / 19 21 %	0	0	0
Ug varie Ig varie (bilan)	4 / 39 10 %		0	
Ug constant (bilan)	25 / 39 64 %		23 / 39 59 %	

Analyse :

1 - les élèves ayant suivi la séquence sont presque aussi nombreux à attribuer une d.d.p. constante aux bornes du générateur aux deux questions, mais ils sont encore 31 % à la faire varier, ce qui montre que cette propriété, sur laquelle s'est appuyée toutes les expériences, n'est pas une évidence pour un tiers de la population ayant suivi la séquence ;

2 - seulement autour du quart de cette population possède en fin de première une représentation correcte des propriétés d'un générateur, ce qui représente une avancée par rapport aux réponses avant enseignement, mais qui reste modeste ;

3 - le vocabulaire le plus rencontré chez les élèves ayant suivi la séquence serait « d.d.p. aux bornes » et « intensité traversant le générateur constants », alors qu'avant enseignement ils parlaient de courant, ou bien de « U varie » ou « I constant » : dans les deux montage on observe l'importance de la représentation d'un générateur à débit constant, mais on remarque également que nommer un symbole participe à sa prise de signification.

Une majorité d'élèves ayant suivi la séquence (59 %) respecte la constance de la d.d.p. aux bornes du générateur, mais cet acquis reste à généraliser, en lien avec une meilleure connaissance du rôle du générateur et du concept d'intensité.

2 – le fil

Comme tout conducteur, soumis à une différence de potentiel, le fil est parcouru par un courant. Etant très bon conducteur, la d.d.p. à ses bornes est faible, on a l'habitude à ce niveau d'étude de la négliger et d'écrire $U_{fil} = 0$.

Tableau des réponses concernant le fil

Réponse Classe	$U_m = 0$ $I_m \neq 0$	$U_m = 0$ seul	$U_m = 0$ $I_m = 0$	$U_{f_1} \neq 0$ $I_m \neq 0$	$U_m \neq 0$ seul	ss. réponse
Seconde	42 / 62		4	6		9
62 élèves	68 %		6 %	10 %		14,5 %
Première	24 / 39	2 / 39	2 / 39	0	4 / 39	7 / 39
39 élèves	61 %	5 %	5 %		10 %	18 %

Certaines réponses recueillies en classe de seconde par la même population (aux aléas près du passage dans la classe supérieure), qui peuvent correspondre aux mêmes réponses ont été indiquées.

Entre la classe de seconde et celle de première il apparaît peu d'évolution au niveau de ces réponses. La séquence a soulevé des questions sur quelques aspects implicites du circuit électrique, tel le fil.

On observe qu'un an après enseignement, les élèves ayant suivi cet enseignement ont conservé leurs connaissances à son sujet, mais il en reste pour fournir une réponse révélatrice d'une confusion de propriétés, soit imaginant un fil parcouru par une intensité nulle, soit un fil qui posséderait à ses bornes la d.d.p. du générateur, ce qui signifie que dans la perspective d'une suite à cet enseignement de l'électricité, il conviendrait de revenir :

- sur le statut du fil, ce dipôle trop simple et usuel, jamais enseigné, mériterait qu'on lui consacre du temps ...
- sur les concepts I et U pour que les élèves arrivent à s'en faire une représentation qui conduise sur ce dipôle à des prévisions correctes

pour démarrer sur une base minimale indispensable de connaissances communes (pédagogie de la maîtrise).

γ – réponses faisant appel à des lois de la d.d.p.

Le détail des réponses fournies n'est pas disponible pour la classe de seconde, nous pourrions seulement en donner un bilan.

1 – Elèves qui utilisent la loi de la d.d.p. pour les dipôles montés en série

**Tableau des réponses appliquant une propriété de la d.d.p.
aux dipôles montés en série**

Réponse Classe	Correcte	Avec partage égal Loi « collège »	Autre dûe à $I_g = Cte$	Bilan
Seconde				25 / 62
62 élèves				40 %
Première	7 / 39	5	4 + 1	17
39 élèves	18 %	13 %	13 %	44 %

Il y a 44 % de la population ayant suivi la séquence qui réinvestit une loi de la d.d.p. pour les dipôles en série placés dans un montage mixte, résultat voisin de celui de la classe de seconde. On retrouve sur ce montage les représentations déjà rencontrées qui ont, rappelons-le, l'avantage de simplifier la démarche pour répondre en évitant en particulier le calcul de la résistance équivalente :

- le partage égal, généralisation de la représentation apprise en collège avec des dipôles identiques ;
- le générateur à débit constant.

2 - Elèves qui utilisent la loi de la d.d.p. pour des dipôles montés en dérivation

**Tableau des réponses appliquant une propriété de la d.d.p.
aux dipôles montés en dérivation**

Réponse	Correcte	U dipôle = Ug Loi « collège »	Autre due à Ig = Cte	Bilan
Classe				
Seconde				24 / 62
62 élèves				39 %
Première	12 / 39	6 / 39	2 / 39	20
39 élèves	31 %	15,4 %	5 %	51 %

Il y a 51 % de la population ayant suivi la séquence qui réinvestit une loi de la d.d.p. pour les dipôles en dérivation placés dans un montage mixte. On observe, comme aux questions V₂, un meilleur réinvestissement des propriétés de la d.d.p. pour les dipôles en dérivation.

3 - Elèves qui ont mis en oeuvre ces deux propriétés de la d.d.p. sur leur montage mixte

On peut établir une comparaison entre les réponses recueillies en fin de classe de seconde et celles fournies en fin de classe de première. Nous allons donner les réponses d'une part en fonction du nombre d'élèves interrogés, puis, en fonction du nombre de réponses fournies :

**Tableau des élèves ayant mis en oeuvre deux propriétés de la d.d.p.
sur le montage mixte**

Réponse	Lois correctes	« Lois d.d.p. collège »	Sans réponse
Classe			
Seconde	9 / 62	10	18
/ 62 questionnaires	15 %	16 %	29 %
Seconde	9 / 44	10	
/ 44 réponses	20 %	23 %	
Première	6 / 39	6	9
/ 39 questionnaires	15 %	15 %	23 %
Première	6 / 30	6	
/ 30 réponses	20 %	20 %	

On note peu d'évolution entre les réponses fournies en classe de seconde et celles de première : les acquis restent stables aussi à ce niveau d'analyse.

Remarque : à cette question il ne se trouvait aucun élève ayant suivi un enseignement habituel en classe de seconde pour réinvestir les deux propriétés de la d.d.p. sur le circuit mixte, en fin d'année, alors que cinq en deviennent capables en classe de première... Cette remarque indique une prise de sens de ce concept pour ces élèves, telle qu'ils sont proportionnellement plus nombreux à répondre et plus nombreux à fournir une réponse correcte en classe de première. Une fois de plus l'origine d'un tel progrès ne peut se trouver qu'au niveau de l'option sciences expérimentales...

2 – e – 5 – Analyse en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence

Le but de l'enseignement des bases de l'électrocinétique est de faire remplacer par l'élève sa « notion polyvalente de courant », par deux concepts distincts aux propriétés propres, dont la d.d.p. Observons quelles propriétés spécifiques l'élève lui attribue :

– propriété de la d.d.p. aux bornes du générateur

Nous avons constaté (conclusion et tableau p.85) que 59 % des élèves ayant suivi la séquence et 73 % de leurs réponses respectent la constance de la d.d.p. aux bornes du générateur, dont près de la moitié raisonnent

à débit constant, c'est à dire que pour eux les deux concepts, ont les mêmes propriétés au niveau du générateur. La séquence a permis à des élèves d'attribuer ses propriétés d'intensité et de d.d.p. au générateur sur le circuit mixte mais c'est encore une minorité voisine de 1 / 5. Le travail est à son début ... d'autant que, question de simplifier la représentation, le programme, qui par ailleurs ne parle jamais du générateur, prévoit l'enseignement de la loi d'Ohm générateur !

- propriété de la d.d.p. aux bornes du fil

Contrairement au générateur, il est prévu par le programme de parler du fil, au moins pour ce qui est de la d.d.p. à ses bornes si faible, qu'il est convenu de la considérer nulle. Aussi n'est-il pas étonnant que ce dipôle soit un peu mieux connu des élèves. Nous avons observé p. 86 (tableau et conclusion) que la majorité des élèves ayant suivi la séquence prévoyaient une circulation dans le fil et une d.d.p. négligeable à ses bornes. Mais nous avons rencontré des élèves (13 % des réponses) toujours dépourvus de représentation de la circulation : ils la prévoient nulle dans un fil en circuit fermé... la prise de sens des concepts est en cours d'apprentissage.

- acquisition des propriétés pour les dipôles

1 - montés en série : 37 % des réponses prévoient une répartition de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série en fonction de ces dipôles, 20 % la prévoient équitable (loi « collègue ») quand 33 % l'ignorent.

2 - montés en dérivation : la loi correcte figure dans 40 % des réponses des élèves ayant suivi la séquence, 20 % des réponses prévoient une d.d.p. aux bornes des dipôles, en dérivation entre eux, égale à celle du générateur tandis que 33 % l'ignorent.

En fait la réponse correcte qui regroupe les deux lois a été fournie par 31 % des réponses complètes de la séquence, ce qui revient à dire qu'un an après la séquence, le cinquième des élèves ayant travaillé avec fournissent la réponse correcte à des questions numériques sur le circuit mixte, ce qui confirme la pérennité des acquis venus de cet enseignement.

- remarques au sujet de lois rencontrées sur les montages mixtes :

On a trouvé chez un élève $U_g = \sum U \text{ dipôles}$ ce qui ressemblerait à une généralisation abusive de la loi apprise pour des dipôles montés en série, aux montages mixtes ... ? Selon le montage on peut peut-être trouver une combinaison de lois I ou U qui conduirait à la même prévision, aussi en l'absence de justification de la réponse, elle reste difficile à interpréter.

On a également rencontré $U = \text{constante}$ ce qui, pour les dipôles montés en série, ressemblait à une loi de continuité du débit et pour des dipôles en dérivation à une loi collègue, or cette réponse qui ne se trouve jamais justifiée ... a le mérite de la simplicité et de dispenser l'élève de tout détour pour répondre, comme les réponses à débit constant. Cette réponse se trouve chez 4 / 39 élèves ayant suivi la séquence.

CONCLUSION :
essai de synthèse des réponses à ce questionnaire
en lien avec les objectifs d'apprentissage poursuivis par la séquence

A / concept de circulation

1 – Unicité du débit pour des dipôles montés en série

1 - a - Tableau des élèves de la séquence ayant respecté l'unicité du débit
(réponses qualitatives)

Question Classe	I	II	III série	IV I' / I'3 br. principale	IV i / I' et i3 / I'3 br. principale
Total (mai 99) 2°	62 / 62 100 %	57 / 62 92 %	26 / 30 87 %	23 / 30 77 %	18 / 32 56 %
Total (mai 00) 1°S	33 / 39 84,6 %	35 / 39 90 %	19 / 20 95 %	16 / 20 80 %	18 / 19 95 %

1 - b - Tableau des élèves de la séquence ayant respecté l'unicité du débit
(réponses numériques)

Question Classe	V ₁	V ₂ Série	V ₂ dérivation	V ₃ Br. principale	V ₃ Br. dérivée
Seconde	60 / 62 97 %	8 / 30 correct 27 % 15 / 30 Ig.Ct. 56 %	12 / 32 correct 38 % 15 / 32 Ig Ct. 47 %	20 / 62 élèves 32 % 20 / 24 réponses 83 %	9 / 11 réponses 82 %
Première	38 / 39 97 %	6 / 19 correct 32 % 9 / 19 Ig Ct. 47 %	8 / 20 correct 40 % 10 / 20 Ig Ct. 50 %	18 / 21 réponses 86 %	7 / 10 réponses 70 %

1 - c – Analyse : l'unicité du débit peut être compatible avec le raisonnement correct comme avec le raisonnement à courant constant quoiqu'il arrive au circuit.

Observations : comparaison quantitatif / qualitatif

Les élèves ayant suivi la séquence, dont les réponses qualitatives respectent l'unicité du débit pour les circuits comprenant un ou deux récepteurs, sont entre 80 et 95 % quelque soit le montage proposé.

Ils sont aussi nombreux à le respecter dans leurs réponses quantitatives jusqu'à la question 3 où les réponses absentes ou partielles viennent perturber l'étude.

Ces résultats sont voisins de ceux établis lors du passage du questionnaire en Mai 99 lorsque ces élèves étaient en classe de seconde.

Sur la partie qualitative, on peut noter de question en question, un taux de réponses à courant constant qui s'élève, au fur et à mesure que le circuit se complique et que la réponse correcte nécessite davantage d'étapes, faisant éventuellement appel à la d.d.p. ou à la résistance équivalente.

Conclusions : quantitatif / qualitatif

Les élèves raisonnent mieux qu'ils ne calculent : en effet, les réponses qualitatives sont meilleures que les numériques, ce qui peut s'expliquer par le fait qu'un calcul est piloté par un raisonnement, et qu'une réponse chiffrée nécessite plusieurs étapes de calculs où des erreurs peuvent se glisser ... et où, pour aller plus

vite, l'élève a vite fait d'injecter une hypothèse supplémentaire telle le générateur gardant le même débit, ou des lois valables dans des situations particulières qu'il généralise.

- Le peu de travail quantitatif effectué au cours de la séquence a fait apparaître une lacune lors de l'étude quantitative de circuits mixtes : l'élève n'a pas eu le temps, de mesurer l'intérêt de la résistance équivalente ce qui explique la difficulté de fournir une réponse chiffrée sur les circuits mixtes.

2 – La loi des nœuds

2 - a – Tableau récapitulatif des élèves de la séquence ayant respecté la loi des nœuds aux différentes questions

question	III	III	V ₂	V ₂	V ₃	V ₃
Partage Classe	=	≠	=	≠	=	≠
Seconde	7 / 32 élèves 22 %	25 / 32 élèves 78 %	5 / 30 élèves 17 %	14 / 30 élèves 47 %	6 / 35 réponses 17 %	12 / 35 réponses 34 %
Total	100 %		63 %		51 %	
Première	2 / 19 11 %	17 / 19 89 %	3 / 20 15 %	8 / 20 40 %	3 / 16 18 %	7 / 16 44 %
Total	100 %		55 %		62 %	

(questions III et V₂ : c'est le % calculé sur l'ensemble des élèves

question V₃, le % des réponses fournies, en raison du petit nombre d'élèves ayant fourni une réponse)

2 - b – Synthèse des observations

Les élèves qui respectent la loi des nœuds sont ceux qui utilisent les propriétés des concepts I et U pour répondre, et non certaines représentations comme le raisonnement à courant constant, ou une intensité traversant un dipôle qui serait constante, ou $I_{fil} = 0 \dots$

On observe que sur la question qualitative, il y a 100 % de réponses qui respectent la loi parmi les élèves ayant suivi la séquence, ce qui montre qu'elle est connue de tous.

Le passage au quantitatif leur offre divers outils et différentes approches, parmi lesquels on a constaté une préférence pour la loi d'Ohm. Ils l'utilisent en lien avec un générateur à débit constant ce qui leur permet de fournir une réponse à toutes les questions sans utiliser la loi des nœuds, qui se trouve violée sans qu'ils s'en rendent compte le plus souvent (il n'y a qu'un élève qui le remarque).

Les réponses qualitatives sont plus nombreuses et meilleures que les réponses quantitatives, qui nécessitent de faire appel aux propriétés des deux concepts.

3 – Débit du générateur

3 - a – Tableau des élèves adaptant le débit du générateur au circuit (réponses qualitatives)

Question Classe	II	III série	III dérivation	IV (R1 + R2) // R3	IV (R1 // R2) + R3
Seconde	47 / 62 76 %	16 / 30 53 %	14 / 32 44 %	9 / 30 30 %	19 / 32 59 %
Première	33 / 39 85 %	16 / 20 80 %	11 / 19 58 %	8 / 20 40 %	15 / 19 79 %

3 - b – Tableau des réponses qui font apparaître une interaction entre le générateur et le circuit

(réponses numériques)

Classe	Question	V ₂ série	V ₂ dérivation	V ₃ mixte
Seconde		7 / 25 28 %	12 / 28 43 %	5 / 24 21 %
Première		6 / 16 37 %	8 / 18 44 %	9 / 23 39 %

3 - c – Synthèse des observations

Les élèves ayant suivi la séquence fournissent de meilleures réponses aux questions qualitatives. Pour les réponses chiffrées, les outils à employer ne leur sont pas assez familiers, telle la résistance équivalente, ce qui les conduit à émettre (plus ou moins explicitement) des hypothèses fausses, comme la constance du débit de la branche principale. Plus des trois quarts de ces élèves fournissent une réponse correcte sur le circuit simple ou en série, ils sont moins familiers du montage avec une dérivation ou mixtes.

La majorité des réponses qualitatives correspond à une interaction entre le générateur et son circuit : le concept de système en interaction semble faire partie des représentations du circuit de ces élèves. On peut penser à un effet conjugué des hypothèses, telles le travail qualitatif sur des circuits évolutifs avec recours à des analogies (chaîne de vélo) et le souci de la maîtrise des prérequis (même si, avec l'avancée de la séquence, faute de temps pour réaliser des entretiens de remédiation, sur un nombre d'élèves croissant avec la complexité des circuits, ils ne furent pas toujours très bien maîtrisés).

En conclusion, sur ces différents objectifs d'apprentissage, les observations concordent :

- ils raisonnent mieux qu'ils ne calculent ;
- les acquis de seconde se retrouvent chez une majorité d'élèves en fin de première, (l'option sciences expérimentales a sans doute contribué pour une part à la stabilisation quand ce n'est pas à des progrès), au niveau de la conservation du débit quelque soit le montage, comme au niveau du concept de système.

B / concept de d.d.p.

L'enseignement de la séquence introduisait le générateur comme cause de la circulation en raison de la d.d.p. présente à ses bornes, puis passait à l'observation des éléments présents dans un circuit : le fil, l'interrupteur ouvert ou fermé, les dipôles passifs suivant le montage ... Observons les réponses fournies concernant certains de ces éléments (les autres, tel l'interrupteur ne figurant pas dans les questions) :

1 – Le générateur

1 - a – Tableau des réponses qualitative sur la d.d.p. aux bornes du générateur (réponses à la question II, circuit simple, évolutif)

Classe	Réponse	Ug constant	Ug varie	Sans réponse
Seconde		33 / 62 53 %	26 42 %	3 5 %
Première		28 / 39 72 %	11 28 %	0

L'importance des acquis conservés entre la classe de seconde et celle de première est grande : si les 33 élèves de seconde ayant fourni la réponse correcte en seconde se retrouvent parmi les élèves de 1^{re}S, il en reste 28 / 33 à l'avoir conservée, soit 85 %. De même on peut penser que la diminution relative du nombre des autres réponses peut avoir un lien avec la sélection et la motivation des élèves ayant fait le choix d'études scientifiques.

1 – b - Tableau des élèves considérant la d.d.p. aux bornes du générateur constante

(réponses numériques)

Question circuit réponse Classe	V ₂ simple Ug = Cte	V ₂ 2 récepteurs Ug = Cte et Ig varie	V ₃ mixte Ug = Cte	V ₃ mixte Ug = Cte et Ig varie
Seconde	42 / 62 68 %	31 / 62 50 %	39 / 62 63 %	20 / 62 32 %
Première	25 / 39 64 %	11 / 39 28 %	23 / 39 59 %	8 / 39 21 %

2 – Le fil

Tableau des réponses recueillies à la question V₃
(réponses numériques)

Classe	Réponses avec Ufil = 0	En % de la population (et Ifil ≠0)	En % des réponses
Seconde	42 / 62	68 %	42 / 53 79 %
Première	24 / 39	61 %	24 / 32 75 %

En résumé, pour ce qui concerne le générateur la majorité des élèves ayant suivi l'enseignement de la séquence respectent la constance de la d.d.p. aux bornes du générateur. En seconde ils étaient presque aussi nombreux à imaginer en même temps la possibilité de variation de son débit selon le circuit, ce qui ne semblerait plus vrai en première.

Pour ce qui est du fil, élément du circuit moins étudié que le générateur, on observe une évolution comparable des réponses entre la classe de seconde et celle de première : concernant ces composants, les acquis sur le concept de d.d.p. semblent moins bien stabilisés que ceux sur l'intensité.

3– D.d.p. aux bornes des éléments d'un circuit en série

3 - a – Tableau des élèves utilisant une loi d'additivité de la d.d.p. sur le circuit série

(réponses qualitatives)

Question circuit Classe	I simple	II simple	III série Partage ≠	III série Partage =	IV mixte Partage ≠	IV mixte Partage =
Seconde	53 / 62 85 %	33 / 62 53 %	17 / 30 57 %	6 / 30 20 %		
Première	37 / 39 95 %	28 / 39 72 %	11 / 20 55 %	7 / 20 35 %	11 / 20 55 %	7 / 20 35 %

3 - b – Tableau des élèves utilisant une loi d'additivité de la d.d.p. pour des dipôles montés en série

(réponses numériques)

Question circuit	V ₁ simple	V ₂ série Partage ≠	V ₂ série Partage =	V ₃ mixte Partage ≠	V ₃ mixte Partage =
Classe					
Seconde	44 / 62 71 %	21 / 32 66 %	3 / 32 9 %		
Première	30 / 39 77 %	13 / 19 68 %	2 / 19 10 %	7 / 39 18 %	5 / 39 13 %

3- c – Synthèse d'observations

La majorité des élèves ayant suivi la séquence utilisent la propriété de la d.d.p. avec partage différencié sur le circuit série, mais sont plus nombreux à envisager un partage égal sur le circuit mixte, étape non enseignée ... serait-elle un passage obligé de l'apprentissage ?

Le réinvestissement de l'acquis sur le montage série au montage mixte semble parfaitement s'opérer sur les questions qualitatives, mais moins bien sur les réponses numériques, pour des raisons déjà invoquées.

4 – D.d.p. aux bornes d'éléments montés en dérivation

4 - a – Tableau des élèves utilisant la loi de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en dérivation

(réponses qualitatives)

Question circuit	III 2 récepteurs	IV mixte Partage ≠	IV mixte Partage =
Classe			
Seconde	26 / 64 41 %	2 / 32 6 %	10 / 32 31 %
Première	13 / 19 68 %	1 / 19 5 %	7 / 19 37 %

4 - b– Tableau des réponses utilisant une loi de la d.d.p. en dérivation

(réponses numériques)

Question circuit	V ₂ 2 récepteurs	V ₃ mixte Loi correcte	V ₃ mixte Loi collège
Classe			
Seconde	20 / 30 67 %	5 / 30 17 %	2 / 30 7 %
Première	15 / 20 75 %	12 / 39 31 %	6 / 39 15 %

4 - c – Remarques

La première vient de l'obligation qui a été faite de tenir compte de l'impact de l'option sciences expérimentales de première S : en effet entre la classe de seconde et celle de première non seulement le % de réponses correctes a augmenté pour toutes les questions, ce qui pourrait s'expliquer par un effet de la sélection, mais parfois le nombre de celles-ci, ce qui paraît impossible en l'absence d'apports extérieurs. Les révisions

faites avec le chercheur ont permis à certains élèves d'entrevoir une représentation de la circulation et du concept de d.d.p. et une cohérence dans les observations sur le fonctionnement de petits circuits simples : 2 heures ont suffi pour que des élèves intéressés, (ayant fait le choix d'une classe de première scientifique avec de plus l'option sciences expérimentales : c'est une double sélection naturelle...) que l'on peut imaginer motivés par cet enseignement, progressent. Signalons que cet espace de remédiation est supprimé à partir de cette année.

Ensuite, est-il besoin de rappeler que le même travail effectué avec 20 élèves de première S qui s'investissent dans la tâche ou 18 de seconde plus ou moins concernés ne produit pas les mêmes effets : **il nous paraît personnellement désastreux de prétendre mettre tous les élèves de seconde dans le même moule.** Ils ont un passé de « bon en ... » ou de « nul en ... » qui les conduit à être plus ou moins actifs à tel ou tel cours et si la démarche de la séquence les oblige à être actifs en classe, elle ne peut les obliger à fournir chez eux le travail personnel nécessaire... et peu à peu l'écart se creuse entre ceux qui s'intéressent et travaillent et ceux qui ne font que ce à quoi on les oblige ... Comme disait P.Boudieu « *A force d'ignorer les différences, on les exaspère.* »

4 – d - Synthèse des observations

en lien avec les objectifs d'apprentissage et les hypothèses mises en jeu au cours de la séquence :

4 – d.1 – Les élèves ont mis en oeuvre leurs représentations qualitatives pour répondre aux questions numériques. Les réponses qualitatives sont souvent meilleures. En effet pour fournir une réponse chiffrée, l'élève doit lever deux difficultés, passer par deux étapes :

- rechercher la démarche (lois, représentations ...) qui lui permettront de passer de la question à la réponse. Lorsqu'il y a des étapes, c'est pour eux une difficulté supplémentaire que de raisonner en empruntant des étapes qui leur restent à définir : ils effectuent alors un choix de moindre effort, soit le générateur à débit constant, ou mieux le courant constant partout !

- puis mettre en oeuvre sans erreur les outils mathématiques : à ce sujet il est apparu des lacunes, par exemple au niveau des unités, qui à ce stade d'enseignement auraient dû être réglées avant et ailleurs. Il est vrai qu'en terme de pédagogie de la maîtrise, nous ne nous sommes intéressés qu'au qualitatif et nous avons privilégié un travail essentiellement qualitatif : pour nous le passage au quantitatif reste une question ouverte...

4 – d.2 – On a observé, sur un grand nombre de questions, un % de réponses correctes et d'éléments de connaissance voisins, au sein de la population ayant suivi la séquence, même un an après enseignement. C'est à dire que la majorité de leurs réponses montrent un début de différenciation de la notion de courant en concepts distincts de la physique ayant des propriétés bien spécifiques.

Il semble que l'on puisse émettre l'hypothèse que ces acquis aient un lien direct avec l'enseignement reçu, à savoir un effet conjugué des hypothèses mises en jeu et de la démarche de test d'hypothèses où l'élève investit et teste ses propres hypothèses, où il est impatient d'avoir la réponse que lui fournit l'expérience, ce qui l'amène à se poser des questions ... en un mot le rend actif dans la construction de ses connaissances, à partir de ce qu'il sait, ou croit savoir.

Malgré des lacunes de mise en place des hypothèses, les observations liées aux objectifs d'apprentissage révèlent des acquis stables dans le temps pour les élèves de Brive ayant suivi la séquence et continuant en 1^oS, pourquoi ? Sans doute en lien avec :

- **la pédagogie de la maîtrise** qui a conduit à poser des questions sur des éléments du circuit jamais enseignés dans le cadre de la représentation de la circulation comme l'interrupteur ouvert (au sujet duquel nos observations ont confirmé, s'il en était besoin, que lorsqu'une notion n'est pas enseignée, l'élève conserve sa représentation, qui dans ce cas n'est pas circulaire (L.Jourdes, 1999)), ou le générateur ;

- le travail sur des **circuits évolutifs** qui leur permet de répondre à la question II (qui déroutait les élèves ayant suivi un enseignement habituel), leur apprend à mesurer l'influence d'une modification d'un élément de circuit sur l'ensemble du circuit ce qui contribue à ébranler la représentation du générateur à débit constant, avec l'aide concrète que représente

- l'apport d'**analogies** comme par exemple la chaîne de vélo qui permet à la fois d'illustrer la continuité du débit et l'interaction entre les éléments ;

- ce travail **qualitatif** oblige à se représenter sans se reposer sur des relations mathématiques vides de sens (beaucoup plus mises en oeuvre par les élèves de l'enseignement habituel), et évite de commencer un

exercice en tapant sur sa calculatrice. L'approche qualitative est d'après les études à ce sujet, la première étape de résolution de problème chez « l'expert » (E. Chalouhi ; 1981))

– l'impact de l'hypothèse énergétique est plus difficile à mesurer, les réponses en termes d'énergie restant marginales en fin d'enseignement. L'enseignement de la séquence parle d'échanges énergétiques avec l'analogie de la chaîne de vélo, puis lors de l'influence de l'ajout en série ou en dérivation d'un dipôle.

Ces hypothèses ont donc été mises en oeuvre par

- des enseignants de bonne volonté (cela suffit-il ?)
- dans des conditions d'enseignement habituelles, classes de plus de 30 élèves, mais bénéficiant d'une « sélection » par un projet professionnel scientifique (ce qu'un audit est venu supprimer au nom de la loi ...)

donc pas dans les meilleures conditions ... et malgré tout, un an après, on observe des connaissances stables sur le circuit électrique (on avait eu l'occasion d'observer que la séquence, enseignée dans des classes au projet non scientifique permettait à ces élèves d'acquérir des connaissances au moins égales, et souvent supérieures à celles d'élèves au projet scientifique ayant suivi un enseignement habituel).

Ces hypothèses semblent donc à même de faire progresser la connaissance des élèves de façon durable. Il resterait à imaginer comment pouvoir mieux les exploiter ...

En résumé :

Dans l'analyse de ce questionnaire passé en fin de 1^oS, un enseignement de 3 h. lors de la première séance de l'option sciences expérimentales n'a pas pu être passé sous silence, sinon les progrès, entre la classe de 2^o et celle de 1^o, de certains élèves devenaient incompréhensibles. Cela n'avait pas été prévu, ce sont les observations qui nous y ont contraint. Nous n'avions pas imaginé qu'un enseignement aussi bref puisse avoir un tel impact. Pour certains élèves de la séquence il a contribué à la pérennité des acquis, et il a permis des progrès qui se retrouvent en fin d'année de première.

On peut conclure à des acquis non éphémères, acquis que des élèves ayant eu l'enseignement de la séquence en 2^o, étaient prêts à partager avec leur voisin au cours de la séance de tests d'hypothèses de l'option, qu'ils illustraient avec les analogies qualitatives de la séquence.

Suite à cette étude nous ne pouvons que regretter la disparition de l'espace de liberté que pouvait constituer l'option sciences expérimentales de 1^oS. Elle laissait du temps à l'élève pour :

- tester, expérimenter, apprivoiser la démarche de test d'hypothèses et ainsi
- la science pouvait devenir intelligible pour lui ; il avait le plaisir de comprendre, enfin !

IV – La séquence vécue par les élèves

Dans la deuxième partie, nous avons évoqué en quelques lignes les réactions des élèves aux différentes activités demandées lors de la mise en oeuvre de la séquence. Nous y revenons car elles constituent, nous semble-t-il, un résultat intéressant.

1 – Les questionnaires

Avant le passage du premier questionnaire, nous avons lu aux élèves un texte introductif (Annexe II) emprunté à J.L.Closset, définissant ce que l'enseignant en attend et l'intérêt pour l'élève de fournir la réponse la plus précise possible.

Nous avons toujours observé des questionnaires remplis avec le plus grand sérieux, comme si les élèves avaient bien compris tout le bénéfice qu'ils pouvaient en retirer.

Le plus souvent leur réponse est le fidèle reflet de leur façon de se représenter le fonctionnement du circuit. Cela n'a pas empêché, qu'à l'occasion de la mise en commun des prévisions, la réponse du voisin déstabilise la réponse première de certains élèves. Mais lors de la mise en oeuvre expérimentale du test d'hypothèse nous avons pu mesurer combien ce qui était écrit correspondait vraiment à des prévisions dont ils étaient certains... et combien un autre comportement du circuit pouvait les étonner...

2 – Les travaux pratiques, tests d'hypothèses

Les questionnaires étaient toujours suivis de la mise en commun des hypothèses exprimées dans la classe. Les élèves se trouvant dépourvus de moyens de privilégier plus l'une que l'autre, acceptaient volontiers l'idée d'une mise à l'épreuve de l'expérience. La réalisation du montage allait très vite : si l'observation était surprenante ils le recommençaient si besoin, ou observaient celui des autres. Si les phénomènes se ressemblaient alors ils recherchaient auprès des copains une explication... et même auprès de l'enseignant.

Si l'élève était actif lorsqu'il remplissait son questionnaire, il le paraissait combien plus en travaux pratiques : si l'expérience contredit sa prévision, sa certitude est ébranlée... il cherche à comprendre... et les paroles du copain qui avait prévu juste ne l'y aident pas toujours...

Dans cette situation, nous avons mesuré l'aide à la construction d'une représentation que peut apporter un enseignement qualitatif... A partir de cet apport l'élève poursuit seul le raisonnement : parfois il se demande si maintenant, au lieu de deux lampes il y en avait trois, on observerait... et il cherche la confirmation expérimentale de ce qu'il pense avoir compris...

Comme me l'a écrit une expérimentatrice : *« même s'ils font tous la même chose, le questionnaire préalable... fait que leur même manip prend tout le temps le cadre d'une question personnelle. On sent qu'ils sont dedans. Le verdict du résultat est attendu en tant que tel. »*

C'est là un intérêt qui nous est apparu très important : même après la mise en commun des prévisions, qui devrait relativiser la justesse de la prévision et élargir le questionnement, chaque élève reste au fond un peu persuadé de détenir la vérité. Il vient à l'expérience avec son état de connaissance. L'observation l'interroge à ce stade et va lui permettre de progresser à partir de là. Cela signifie que la démarche de test d'hypothèses a permis **d'individualiser l'enseignement** au sein du groupe classe, de répondre à la question que chaque élève se pose à son niveau. On peut penser que la réponse apportée à sa question se trouvera en lien direct avec ses aptitudes et ainsi lui permettra d'avancer dans la connaissance.

3 – Les entretiens

3 - a – Les entretiens avec les élèves de la séquence

Nous avons réalisé des entretiens en cours d'élaboration de la séquence dans le but de préciser des représentations correspondant à des réponses inattendues. Elles étaient pour nous source de questions que nous souhaitions poser à l'élève.

Notre attitude correspondait à une volonté de comprendre l'origine de la réponse dans le but de conduire l'élève à dépasser cette représentation. Les élèves ont toujours été très coopérants au cours des entretiens. Certains élèves dont l'intégration dans le groupe classe pouvait soulever des difficultés participaient activement à l'entretien. Lorsque nous nous quittons nous avons tous deux fait un bout de chemin :

- soit en ayant appris à donner un même contenu à un mot comme le courant qui pouvait être statique pour l'élève, ou à l'intensité qui serait synonyme de vitesse, ou de force pour d'autres...
- soit en ayant fait travailler d'une part la représentation de l'élève et d'autre part une analogie, ou une représentation microscopique ;
- soit en ayant essayé d'élargir leur regard à l'ensemble du circuit pour leur faire prendre conscience de discontinuités du débit dans leur représentation, ou d'autres anomalies...

Dans tous les cas leur représentation gagnait en cohérence et leur permettrait de mieux appréhender le cours suivant.

3 - b – Les entretiens avec des élèves ayant suivi un autre enseignement

Nous avons par exemple rencontré tous les élèves de 1^{er}S qui avaient rendu un questionnaire incomplet. Ils sont tous venus alors que nous n'avions aucun moyen légal de les y contraindre. Ceci apparaît comme une expression de l'intérêt qu'ils y trouvaient.

Ils arrivaient effectivement dépourvus de réponse, étant dépourvus de tout élément de représentation des concepts d'intensité ou de tension. Une rapide approche qualitative donnant un sens, un contenu à des lois apprises par cœur leur a permis d'envisager le comportement d'un circuit auquel on modifie certains branchements. Ils repartaient heureux de commencer à comprendre... Nous sommes conduits à penser que c'est ce qui devait inciter leurs copains à venir puisqu'ils se rendaient volontiers à l'entretien pris sur leur temps libre.

Dans tous les cas, les entretiens ont été une opportunité pour l'élève de faire état de ses représentations (et pour l'enseignant d'y avoir accès), de lui faire prendre conscience de questions ou de contradictions qui en découlent et qui l'amènent à s'interroger. Il trouve une réponse à sa question. Chaque entretien a été pour l'élève l'occasion d'un enseignement on ne peut plus personnalisé.

4 – Conclusion

Aujourd'hui des scientifiques s'inquiètent et s'interrogent sur la désaffection des jeunes pour la science, sur l'impopularité de la physique. Par exemple P.Léna (1999) constatant que « rien n'est possible sans l'adhésion forte de celui qui apprend » émet l'idée « que notre pédagogie du savoir doit profondément évoluer vers une autre manière d'apprendre et une autre relation entre apprenants et supposés sachants. Elle doit trouver une démarche plus personnelle et plus construite sur le jaillissement intérieur de la curiosité. » G.Charpak (1996) semble lui répondre lorsqu'il écrit : « il faut leur donner un enseignement... qui leur fasse découvrir ce monde avec plaisir... l'idée n'est pas de faire des enfants qui appliquent des recettes scientifiques, mais des enfants qui essaient de comprendre. »

Tout au long de la séquence, questionnaires, entretiens et démarche de test d'hypothèses ont permis d'adapter la progression au rythme de chacun. Nous avons essayé de faire en sorte que même lorsque les entretiens n'ont plus été matériellement possible, l'élève se sente reconnu comme un individu qui a le droit d'en être là où il en est : il a des difficultés, son voisin en a d'autres, toutes sont prises en compte et peu à peu chacun progresse dans la compréhension du fonctionnement du circuit.

Cette démarche apporte un confort psychologique à l'élève, ce qui, à l'heure actuelle, semble avoir une grande importance, car beaucoup de nos élèves se sentent seuls : écouter leurs difficultés, les attendre, les trouver normales est un élément du respect auquel ils sont très sensibles. En tenir compte dans le déroulement de la séquence leur permet de s'exprimer non avec l'appréhension d'être jugés, mais plutôt en sachant que toute information fournie est précieuse car elle permet d'espérer une réponse à leur recherche de sens. Aussi cet enseignement est apparu, lors de l'évaluation par les élèves, comme ayant reçu un accueil favorable, tout spécialement par ceux qui, le reste du temps ne se sentent pas concernés par ce qui se passe à l'école, ou en situation de blocage par rapport à la discipline. Cette démarche a permis de gérer l'hétérogénéité en contribuant à une plus forte motivation de chaque élève amené à progresser sur son chemin cognitif, à partir de ses erreurs.

Dans le même temps, la séquence a mis en place un climat nouveau, des relations nouvelles dans la classe. L'enseignant n'avait plus à gérer des problèmes d'attention et encore moins de discipline comme souvent, de nos jours, ce que B.Charlot (1991) explique par le fait que « la massification récente de l'enseignement conduit à une population d'élèves où travailler et apprendre n'ont pas le même sens pour les apprenants et pour les enseignants :

- pour le jeune il s'agit d'abord d'obtenir un diplôme... et il est très peu question du savoir ;
- pour les profs, c'est aider les élèves à s'approprier du savoir par une démarche active et volontaire. On a là deux mondes radicalement différents. »

L'enseignant de la séquence était le gestionnaire de l'apprentissage en réponse à une demande de l'élève à qui il permet de progresser à partir de ses erreurs. Il se crée alors une sorte de partenariat au fil des interactions maître-élève qui n'a rien de comparable avec les relations mises en place dans un enseignement essentiellement transmissif. A cette occasion, nous avons pu mesurer la soif de comprendre de l'élève, le plaisir de voir confirmer son hypothèse ou de mieux se représenter un phénomène.

Résumé des résultats

A – En termes de suivis

Ayant recueilli les réponses des élèves à différents stades de l'apprentissage, à des questions portant sur des circuits fermés, nous avons pu relever quelle est pour eux l'influence de la résistance sur le débit :

- sur le circuit simple, puis le circuit en série,
- puis au niveau des branches principale et dérivées d'un circuit mixte.

Notre démarche d'apprentissage a permis à une majorité d'élèves d'accéder au raisonnement correct sur le circuit simple, le circuit série et la branche dont la résistance varie, mais ils emploient un raisonnement à courant constant sur la branche principale. Lors de l'analyse d'un circuit mixte, le raisonnement correct semble plus accessible au niveau de la branche dérivée.

Leurs réponses, en cours d'apprentissage, ont permis d'observer que l'élève qui avait sur le circuit série un raisonnement :

- local, choisissait pour analyser le circuit mixte parmi tous les raisonnements ;
- séquentiel, n'utilisait jamais le raisonnement local, mais employait soit celui à courant constant, soit le raisonnement correct ;
- correct, utilisait soit le raisonnement à courant constant, soit le raisonnement correct

Ces observations contribuent à valider l'hypothèse de **hiérarchie des raisonnements** :

Local → séquentiel → courant constant → correct

Les raisonnements pris dans cet ordre peuvent constituer des **étapes d'apprentissage** (sachant qu'un élève est susceptible de sauter des étapes, comme de retours en arrière sur une situation plus complexe), où le gap entre le raisonnement séquentiel et celui à courant constant apparaît moins important que le saut au raisonnement systémique.

B – Autres observations liées à l'expérimentation de la séquence

1 – Existence d'une base de départ voisine

Le premier questionnaire à l'entrée en seconde dans différentes académies recherchait l'existence d'une base commune sur laquelle pourrait s'appuyer l'apprentissage. Les réponses recueillies ont mis en évidence :

a - L'absence de certaines bases

50 % des élèves ne disposent pas de celle de circuit ou de courant comme lié à un mouvement, ou ignorent le rôle d'un nœud ;

50 % seulement perçoivent l'effet d'une résistance montée en série comme celui d'un frein à la circulation ;

100 % ignorent ce que peut représenter le concept de différence de potentiel.

b – Une diversité de représentations du concept d'intensité

50 % de raisonnement séquentiel et autant de raisonnements énergétiques ;

l'inexistence du raisonnement à courant constant, mais

la présence de modèles plus primitifs.

Ces observations tendent à montrer des **lacunes comparables** qui entraînent la nécessité de tout reprendre à la base avec un enseignement du circuit et de la circulation, puis une progression pas à pas.

2 – Différences au niveau des acquis des populations ayant appris avec la séquence

a – A Brive

Des différences sont apparues selon l'enseignant et la section de l'élève. Des élèves ayant un projet scientifique seraient plus engagés dans la tâche d'apprentissage : ils sont plus nombreux à fournir une réponse,

c'est-à-dire à s'être construit une représentation du concept (I, U, R), qui sera d'autant meilleure que son enseignant aura une formation en didactique. Par exemple les élèves du chercheur sont plus nombreux à :

- décrire une représentation qualitative des rôles de la résistance ;
- imaginer une interaction entre le générateur et son circuit, ce qui entraîne de prendre en compte l'ensemble du circuit pour en faire l'analyse ;
- mettre en œuvre des calculs intermédiaires dont celui de la résistance équivalente.

b – Autres académies

Lorsque la séquence a été étendue à des élèves de classes indifférenciées d'autres académies, les observations précédentes se sont trouvées confirmées. Ce fut l'occasion de remarquer que si les élèves de Brive sont les plus nombreux à répondre, à fournir la réponse correcte ou des éléments de réponse corrects, quelque soit le concept, ce sont également les plus nombreux à utiliser une seule propriété de la d.d.p., soit celle en série, soit celle en dérivation étendue à l'ensemble des dipôles quelque soit leur branchement. Cette généralisation ou non différenciation serait-elle une **étape de l'apprentissage du concept de d.d.p. ?**

Les élèves connaissent mieux le générateur que le fil, le circuit série que le circuit en dérivation

Il semblerait qu'ils raisonnent mieux qu'ils ne calculent. Lorsque le circuit se complique et que le calcul demande des étapes, la représentation d'un générateur à débit constant pilote une majorité de réponses numériques. Après le raisonnement séquentiel le **raisonnement à courant constant** apparaît comme un sérieux **obstacle à franchir pour accéder au raisonnement correct.**

3 – Les acquis sont-ils éphémères ?

Nous avons voulu tester les progrès cognitifs des élèves ayant appris avec la séquence un an plus tard. Nous avons trouvé, en fin de 1^{re}S, un nombre supérieur de réponses correctes à certaines questions, à ce qu'il était en fin de classe de seconde. Cette observation nous a conduit à prendre en compte l'enseignement de l'option sciences expérimentales. La première séance de vérification des prérequis aurait permis, à ces élèves sélectionnés et motivés, de rapides progrès qui se retrouvent en fin d'année.

Les effets conjugués de la sélection entre la classe de seconde et celle de première S et de la remédiation apportée par l'option semblent avoir permis une grande stabilité apparente des acquis de seconde qui se retrouvent chez une majorité d'élèves au niveau :

- de la conservation du débit, quelque soit le montage ;
- du concept de système (générateur qui adapte son débit au circuit) ;
- de la différenciation des concepts d'intensité et de d.d.p. en employant un vocabulaire approprié et en leur attribuant des propriétés distinctes ;
- d'une démarche d'analyse rigoureuse prenant en compte tous les éléments de la situation, avant de fournir une réponse qui s'appuie sur une loi.

Ainsi, un an après enseignement, différenciation des concepts et attribution de propriétés spécifiques, approche qualitative et justification rigoureuse caractérisent nombre de réponses fournies par les élèves ayant appris avec la séquence. Mais le travail aurait besoin d'être poursuivi, bien des élèves restant à une étape intermédiaire de l'apprentissage, par exemple :

- ils sont peu nombreux à éprouver le besoin de calculer la résistance équivalente, et parmi eux tous ne s'en servent pas, et plus généralement,
- au niveau de l'étude des circuits mixtes ou la réponse aux questions numériques.

4 – La séquence vécue par les élèves

Beaucoup d'élèves arrivent en seconde en situation d'échec vis-à-vis des sciences physiques. La démarche d'apprentissage semble avoir permis, au sein du groupe classe, **d'individualiser l'enseignement** en faisant exprimer et respecter les représentations qui se transforment éventuellement en hypothèses, ce qui aide l'élève à formuler une question qui lui est personnelle et à lui trouver une réponse.

Les entretiens ont fourni d'autres occasions pour l'élève de préciser ses représentations, au point de mesurer soit le sens différent donné au vocabulaire, parfois même le vide que cache le nom d'un concept, ou les contradictions inhérentes aux prévisions fournies. L'élève a trouvé là aussi une occasion d'avancer dans la compréhension du fonctionnement du circuit, à partir de là où il se trouve.

Quelle que soit l'activité proposée, nous avons vu naître l'intérêt et la curiosité devant les prévisions inattendues des copains ou l'expérience qui contredit les prévisions, et à partir de là, la soif de comprendre. L'évaluation de la séquence par les élèves a été positive : l'élève ne se sent plus jugé, ayant le droit à l'erreur, tremplin vers la connaissance. Les réinvestissements peuvent lui apporter le plaisir de voir confirmée son hypothèse, ou de préciser sa représentation du phénomène.

Quatrième partie

ANALYSE A POSTERIORI

A – Retour sur les hypothèses

Dans l'analyse a priori, nous avons explicité nos choix, leurs conséquences sur le déroulement de la séquence et les effets attendus. Dans l'analyse a posteriori nous venons observer si ces effets se sont produits.

Nous allons rechercher tout d'abord les prédictions émises en lien avec une seule hypothèse. Sa mise en oeuvre s'est déroulée en même temps que d'autres, aussi ne peut-on exclure que les autres soient intervenues. En vérifiant ces prédictions nous savons que nous ne pouvons pas les relier de manière exclusive à la mise en oeuvre d'une seule hypothèse.

Nous rechercherons ensuite les effets de l'ensemble des hypothèses au travail dans la séquence.

A1 – Recherche des effets spécifiques de certaines hypothèses

I – Recherche d'effets en lien avec la maîtrise des prérequis

1 – Exemple de mise en oeuvre de la maîtrise des prérequis

Les questionnaires passés à l'entrée en seconde, ont révélé les représentations des élèves. Au delà de la diversité des descriptions, reflétant l'hétérogénéité de l'état de connaissance, on observe que les élèves :

- pour près de la moitié ont une perception énergétique du circuit ;
- lisent le circuit pas à pas, ce qui les conduit à imaginer l'existence d'un courant d'un côté de l'interrupteur ouvert, quand ce n'est pas des deux côtés ;
- ont une **représentation statique du courant** qui correspond à une présence et non à une circulation ;
- utilisent parfois la loi des nœuds, quand d'autres semblent l'ignorer.

Ces réponses sont le reflet d'une représentation d'un courant matériel, pas toujours fluide, aux manifestations diverses. Ainsi :

- la pile, étant à l'origine de l'existence du courant,
 - o soit il existe toujours du courant à l'intérieur,
 - o soit, au contraire, il passe d'une borne à l'autre par l'intermédiaire du circuit, mais la question de la circulation à l'intérieur ne se pose pas ;
- l'interrupteur étant ouvert, la moitié des élèves conçoivent la présence d'un courant le plus souvent en amont, comme il y a présence d'eau en amont d'un robinet fermé.

Ce courant substantialisé peut donc être présent mais ne pas circuler. Il reste statique dans la pile et / ou certains fils.

Conformément à notre hypothèse de la pédagogie de la maîtrise, nous avons tenté d'uniformiser le niveau de départ, en vue de la construction des concepts de l'électrocinétique, par un enseignement portant sur les notions de circuit et de circulation :

- les éléments conducteurs du circuit, les fils ... où sont présents des porteurs de charge au mouvement désordonné, dont la pile fait partie ;
- la conduction, comme mouvement ordonné de porteurs de charge, le long du
- circuit, boucle fermée ;
- une circulation fluide, sans accumulation et sans perte.

Cet enseignement, comme pour tous les concepts abordés par la séquence a été dans un premier temps transmissif, puis a demandé à l'élève des réinvestissements sur des situations électriquement voisines, souvent perçues différentes par l'apprenant : le fusible ou la lampe grillée remplaçaient l'interrupteur ouvert. Nous pensons ainsi aider l'élève à décontextualiser la connaissance et la lui rendre utile.

2 - Attentes de la maîtrise des prérequis par les élèves

En s'intéressant aux prérequis jugés nécessaires à l'élaboration de la connaissance nouvelle, en assurant si besoin un apprentissage de certains, nous avons voulu homogénéiser la base de départ en vue de construire sur des fondations assurées. Nous en attendions :

– une **amélioration du niveau de maîtrise** des connaissances relatives aux objectifs poursuivis par l'enseignement ;

- une diminution de la dispersion des représentations dans la population concernée par la séquence ;
- en partant du niveau réel de l'élève, nous pensions aussi pouvoir assister à une plus grande implication des élèves dans la tâche d'apprentissage, car elle serait adaptée à l'état de leurs connaissances (état vérifié avant enseignement et trouvé fort éloigné de celui que laissait supposer les documents ministériels).

3 – Observations en lien avec la mise en oeuvre de la maîtrise des prérequis

3 - a – Evolution des connaissances concernant le concept d'intensité

Le concept d'intensité est un concept au sujet duquel nous avons particulièrement réfléchi aux prérequis. Avant de parler d'intensité, nous avons jugé nécessaire de bâtir avec les élèves une représentation :

- du circuit, qui, avant enseignement, était ouvert au niveau du générateur pour le tiers des élèves interrogés, et
- de la circulation, ayant constaté l'existence d'un courant présent, mais qui ne circule pas, en amont d'un interrupteur ouvert chez la moitié des élèves interrogés (toutes académies ou enseignants testés).

Nous avons également été amenés à préciser la lecture d'un schéma électrique : des dipôles représentés géométriquement en série ou en parallèle ne le sont pas toujours d'un point de vue électrique.

Nous allons comparer les raisonnements empruntés à l'entrée en seconde sur le circuit simple par 78 élèves de trois académies, puis par ces mêmes élèves, en fin de seconde, soit quelques mois après la fin de tout enseignement en électricité, sur le circuit série.

Evolution de la représentation du concept d'intensité

Réponse sur le circuit simple avant enseignement : septembre 99	local	séquentiel	correcte	
	28 %	54 %	18 %	
Raisonnement sur le circuit série : après enseignement : mai 2000	local	séquentiel	à courant constant	systémique
	9 %	15 %	15 %	51 %
Evolution	- 19 %	- 39 %	+ 48 %	

Analyse

Avant enseignement, il y avait 28 % d'élèves au raisonnement local et 54 % au raisonnement séquentiel, c'est à dire 82 % au raisonnement non conservatif et 18 % au raisonnement conservatif.

Après enseignement 24 % des élèves ont conservé un raisonnement non conservatif, sur un circuit plus complexe, et 66 % ont acquis un raisonnement conservatif sur le circuit série.

L'effet sur la circulation de l'ajout d'un conducteur résistant en série est abordé avec un raisonnement systémique par 51 % de cette population après enseignement.

Entre la question portant sur le circuit simple et celle portant sur le circuit série il existe une progression dans la difficulté. Au niveau des réponses, fournies par les mêmes élèves, non seulement on n'observe pas de régression, mais au contraire un important progrès cognitif : près de la moitié de ces élèves ont abandonné un raisonnement avec discontinuité du débit et ils sont 51 % à emprunter un raisonnement systémique.

Parmi les prérequis du concept d'intensité il y avait :

- l'unicité du débit le long d'un circuit monté en série, et

- **L'effet sur cette circulation de l'ajout ou du retrait d'un dipôle résistant en série ou en dérivation.**

On a déjà vu que le raisonnement local ou séquentiel correspondait à une double discontinuité du débit. La continuité du débit semble une étape indispensable avant le raisonnement systémique.

Nous pouvons penser que d'autres facteurs que la seule maîtrise des prérequis ont contribué à cette évolution, mais il nous semble aussi que le travail effectué sur les notions utiles à la construction de ce concept ne peut pas être étranger à ce progrès.

Nos observations se retrouvent d'une année sur l'autre, par exemple en 1999, à Brive avec 59 élèves de trois enseignants différents :

Raisonnement sur le circuit série : après enseignement : Mai 1999	local	séquentiel	à courant constant	systémique
	4 %	15 %	20 %	51 %

Nous avons de plus eu l'occasion de noter la stabilité de cette évolution par un questionnaire passé un an plus tard à ceux de ces élèves se trouvant dans une section de 1° S :

Raisonnement sur le circuit série : un an après, en 1° S: Mai 2000	local	séquentiel	à courant constant	systémique
	0	0	20 %	75 %

Il n'y a plus d'élèves ayant suivi la séquence qui empruntent un raisonnement séquentiel : le prérequis de continuité du débit le long d'une boucle conductrice semble acquis sur le long terme, par les élèves de la séquence ayant choisi une filière scientifique. Maintenant ce n'est plus la moitié, mais les trois quart de la population testée qui utilise un raisonnement systémique sur le circuit série.

3 - b – Dispersion des représentations

De la maîtrise des prérequis on peut également attendre une réduction significative des différences interindividuelles, c'est à dire une moindre dispersion des réponses, **une base de connaissances plus large** :

- nous venons d'observer la réduction significative des discontinuités du débit ;
- nous pouvons aussi illustrer un regroupement des représentations à partir des observations de mon stagiaire au sujet du circuit ouvert ou fermé. Son questionnaire a été passé en cours d'année de seconde, à tous les élèves ayant suivi la séquence (3 classes ; 96 élèves). La question est posée à partir d'un circuit mixte, l'interrupteur se trouvant en série avec une ampoule sur une branche. Elle donne lieu aux réponses suivantes :

Evolution de la représentation du concept de circuit

Etude portant sur 96 élèves ayant suivi la séquence

Existence d'une circulation	Circuit ouvert		Circuit fermé	
	Oui	Non Réponse correcte	Oui Réponse correcte	Non Au niveau de la pile
Rentrée 98 Circuit simple	58 %	20 %	45 %	47 %
Printemps 99 Circuit mixte	9 %	91 %	82 %	16 % de ? ou non

Il semble que les effets prévus soient au rendez-vous, et même réinvestis sur des circuits plus complexes. Pourtant nous avons conscience que malgré notre souci d'assurer une maîtrise des prérequis par chaque élève, elle n'a pu qu'être imparfaite pour certains élèves pour diverses raisons : soit personnelles de l'élève, soit temps disponible en dehors de l'horaire de classe.

3 - c – Entraînement des élèves dans la tâche

En prenant en compte leurs explications, ce qui permet un enseignement plus personnalisé, **on attend une motivation des élèves** pour l'étude. Nous allons à sa recherche à partir de leurs réactions en classe :

c - 1 - Suite à l'expression de leurs prévisions et au constat de la diversité des représentations qui éveille leur curiosité, ils ont hâte de passer à l'expérience, comme en témoigne **l'enseignante de Grenoble** : *« J'ai senti tout le bénéfice des questionnaires avant enseignement ... le fait du questionnaire préalable, de la mise en commun des conceptions et / ou des questions des uns et des autres, fait que leur même manip prend tout le temps le cadre d'une question personnelle. Et on sent « qu'ils sont dedans » ; le verdict du résultat est attendu en tant que tel. »*

Face à une expérience aux manifestations inattendues ils sont en recherche d'explications : *« en passant dans les rangs j'ai rencontré des élèves surpris qui ne remettent pas en cause l'expérience. Ils étaient sûrs de leur prédictions et cherchaient à comprendre »* avais-je noté en Novembre 1996.

c - 2 - Voici leurs réactions lors de l'évaluation de la séquence après la première expérimentation, par exemple, en réponse à la question :

« Ce type d'enseignement t'a-t-il permis de comprendre : mieux / pareil / moins bien qu'un cours classique, tels ceux que tu as vécu en 4°, 3°, ou de ton livre ? »

Voici les réponses : **28 mieux** 2 pareil 4 moins bien

(Remarque concernant les « moins bien » : une fille de collègue et ses deux voisines + une élève en grande difficulté à cause du français. Par ailleurs, la séquence crée une rupture du contrat didactique habituel, ce qui déstabilise, est insécurisant.)

c - 3 - Nous avons également pu observer le taux quasiment nul d'élèves ne fournissant pas de réponse à une question, en cours d'apprentissage.

Il est arrivé, au test final, que des élèves ne fournissent pas de réponse aux dernières questions, les plus délicates, par exemple, en Mai 1999. Ce n'est plus une absence d'engagement dans l'apprentissage, mais une absence de représentation du concept, confirmée en entretien.

Conclusion

En cherchant à homogénéiser la base de départ on attendait une plus grande implication des élèves dans la tâche d'apprentissage qui a pu être constatée par les expérimentateurs de la séquence et confirmée lors de l'évaluation de la séquence par les élèves.

On attendait également une amélioration du niveau de maîtrise. Elle a pu être observée, par exemple sur le concept d'intensité, accompagnée d'une diminution de la dispersion des représentations.

II - Recherche d'effets en lien avec l'approche énergétique

En abordant les échanges énergétiques au sein du circuit, nous avons tout d'abord voulu répondre à ce qui, au travers des justifications de leurs réponses, apparaissait comme une préoccupation implicite des élèves :

- le raisonnement séquentiel, peut chercher à traduire, par une modification du « courant », que l'enseignant nomme intensité du courant, l'énergie consommée par le récepteur, de même
- la résistance plus grosse qui aurait besoin de plus de « courant » pour fonctionner.

Y remédier pourrait constituer une étape vers la conservation de la charge et la prise de sens de la différence de potentiel.

1 – Attentes d'une approche énergétique du circuit électrique

Aborder les échanges énergétiques au sein du circuit, c'est à dire au niveau du générateur et des récepteurs, en précisant le rôle des fils, avec, en particulier l'analogie de la chaîne de vélo pour aider à la représentation, nous conduit à espérer :

1 - a – Une diminution du taux d'interprétations dites « énergétiques »

Elles ne sont pas toujours aussi clairement énoncées que le fait Louise : « *l'intensité, c'est de l'énergie, c'est ce qui circule.* » Elles se sont manifestées par les justifications fournies à certaines questions, comme par exemple :

a - 1 – L'influence d'une élévation de la valeur d'une résistance sur l'intensité

Pour justifier l'élévation de l'intensité quand la valeur de la résistance augmente, Sylvain explique :
« *plus un dipôle est puissant, plus il demande d'intensité.* »

a - 2 – L'influence de la suppression d'une branche dérivée

Certains élèves prévoient une élévation de l'intensité dans les autres branches dérivées, comme Charlotte :
« *car elle reçoit toute l'énergie, tout le courant qui se dégage de la pile.* »

a - 3 – Les prévisions sur le circuit série

Certains élèves prévoient une élévation de l'intensité lorsqu'une lampe est ajoutée en série, telle Muriel :
« *le générateur doit fournir plus de courant pour deux ampoules que pour une seule.* »

D'autres élèves parlent d'un partage entre les récepteurs montés en série, partage de l'intensité, des électrons ou de l'énergie, leur permettant de justifier le faible éclairage des dipôles en série, tel :

Karim : « *les deux lampes se partagent les électrons, elles éclairent faiblement.* »

Ces raisonnements énergétiques sont pour la plupart non circulatoires, c'est pourquoi nous avons pensé les faire évoluer à partir du travail avec une analogie reposant sur un système où les échanges énergétiques leur sont familiers : la chaîne de vélo.

1 - b – Une diminution des raisonnements avec discontinuité du débit

(raisonnement local, mais surtout raisonnement séquentiel)

Un raisonnement séquentiel conduisait de nombreux élèves à imaginer ce qui se passe à l'intérieur d'une ampoule comme Florence : « *la lampe puise l'énergie dont elle a besoin et renvoie le surplus.* »

Dans un montage avec deux lampes identiques montées en série, certains élèves pensent qu'une lampe éclaire moins que l'autre, tel Xavier : « *AB prend l'électricité qu'il lui faut, elle brille à son éclat maximum ne laissant pas assez d'intensité à EF pour briller correctement.* »

Dans un montage mixte comportant deux lampes en dérivation (L_2 et L_3) montées en série avec une troisième (L_1), Alice explique que L_1 de la branche principale « *brillera moins que les deux autres puisqu'une partie du courant va être utilisée par L_2 et L_3 .* »

Cette attente faisait également partie de la maîtrise des prérequis, mais aborder l'énergie n'en fait-il pas partie ? Un exemple parmi d'autres illustrant l'impossibilité parfois d'attribuer un effet à une seule hypothèse.

1 - c – Un début de représentation de la différence de potentiel

Une réponse comme celle d'Amélie au sujet de deux ampoules montées en série : « *Les deux lampes ont le même éclat car l'énergie se partage en deux* » évoque une remarque de J.L.Closset (1983) suggérant que certains aspects du raisonnement énergétique pouvaient constituer des points d'ancrage favorables à l'introduction de concepts du physicien. Nous avons retenu l'idée de relier le concept de différence de potentiel aux échanges énergétiques perçus par les élèves. Il existe une différence de potentiel :

- en circuit fermé, aux bornes des composants sièges d'échanges énergétiques, principalement générateurs et récepteurs (et plus il est gros, plus la d.d.p. à ses bornes est élevée dans un montage en série) ;
- en circuit ouvert, entre deux points entre lesquels un échange serait envisageable si on y branchait un récepteur : le générateur, l'interrupteur ouvert (la prise de courant, ou mieux « prise de tension » ?)

2 – Observations en lien avec l'approche énergétique

2 - a - Evolution des justifications énergétiques

a - 1 - Etat initial

Lors des différents essais de la séquence, à Brive, nous avons rencontré de 30 à 40 % d'élèves faisant intervenir un raisonnement en terme d'énergie, particulièrement bien explicité au niveau de l'ampoule, où :
« le courant a été consommé » « il se consomme » « l'ampoule a gardé l'énergie pour pouvoir s'allumer »

Nous nous sommes alors posé la question : est-ce un particularisme local ? Lors de l'expérimentation dans différentes académies, les documents venus d'élèves de l'académie de Grenoble témoignaient de la même sensibilité chez 40 % d'entre eux. Brive se révèle donc dans la moyenne des populations étudiées.

Ainsi près de la moitié des élèves expriment une sensibilité énergétique lors de l'analyse d'un circuit.

a - 2 - 1^o étape de l'évolution

L'enseignement des prérequis de circuit et de circulation était l'occasion d'une première réflexion sur l'énergie. L'analogie de la chaîne de vélo permet d'illustrer à la fois la nécessité d'une boucle fermée, le déplacement des porteurs de charge et le transfert de l'énergie du générateur aux récepteurs.

Ce premier enseignement était suivi d'un réinvestissement portant sur un circuit simple où la valeur de la résistance varie. Il ne restait qu'une à trois élèves, selon les années, pour penser qu'une augmentation de la valeur de la résistance entraîne une élévation de l'intensité.

a - 3 - 2^o étape de l'évolution lorsque le circuit passe d'une à deux ampoules :

Si la lampe ajoutée en dérivation tombe en panne, l'autre récupère son énergie et éclaire plus fort, ou une seule éclaire mieux que deux en dérivation, car elle reçoit toute l'énergie.

Ces réponses sont compatibles avec une représentation d'un **générateur à débit constant**, comme le raisonnement des élèves qui justifient le faible éclairage d'ampoules montées en série par un partage entre les lampes, telle Coralie : « deux lampes en série se partagent le courant ».

Sur le circuit série il existe aussi des élèves pour prévoir une élévation de l'intensité, lors de l'ajout d'une lampe en série, parce que le générateur doit fournir deux fois plus d'énergie.

Sur ces circuits à deux récepteurs autour de 40 % des élèves a développé un raisonnement en terme d'énergie...

Dans les réponses au questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité, venues de classes de seconde de trois académies où se déroulait l'enseignement de la séquence, nous avons trouvé en moyenne **49 %** d'élèves pour penser qu'une résistance plus forte impose, demande, nécessite, utilise ... une plus forte intensité :

Tableau des réponses recueillies au questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité

Raisonnement Population	Local	Séquentiel	A courant constant	Correct
Brive / 35 élèves dont énergétique	17 % 83 %	51 % 44 %	6 %	26 % 44 %
Grenoble / 25 élèves dont énergétique	28 % 100 %	60 % 40 %	0 %	12 % 33 %
Lille / 18 élèves dont énergétique	50 % 44 %	50 % 33 %	0 %	0 %
Moyenne / 78 élèves dont énergétique	28 % 73 %	54 % 40 %	3 %	15 % 42 %

Ainsi, avant l'enseignement de l'intensité, ces justifications peuvent se trouver chez près de la moitié des élèves interrogés. Nous les avons rencontrées dans toutes les populations testées, quel que soit le lieu. On peut noter que cette représentation semble accompagner davantage le raisonnement local (de 44 à 100%, soit 73 % en moyenne) que les autres où la moyenne est autour de 40 %.

L'existence de suivis, particulièrement complets à Brive, (où nous avons réussi à rassembler l'essentiel des traces écrites des élèves tout au long de la séquence) permet de constater que certains élèves ont abandonné leur raisonnement énergétique initial, alors que d'autres se mettent à en exprimer un. Avant enseignement 15 / 35 élèves l'avaient exprimé :

- 8 / 15 l'ont abandonné (1 local, 6 séquentiel, 1 correct)
- 7 / 15 l'ont conservé (1 local, 2 séquentiel, 1 instable entre séquentiel et correct, 3 correct)

A ce stade d'apprentissage le raisonnement énergétique est exprimé par 15 / 35 élèves auxquels s'ajoutent 2 élèves qui changent de représentation selon la question... :

- 7 / 15 sont des élèves qui ont conservé ce raisonnement sur ce questionnaire
- 8 / 15 sont des élèves qui l'ont utilisé pour la première fois à l'occasion de ces questions (4 élèves au raisonnement local, 3 séquentiel, 1 systémique) et
- 2 élèves à la représentation instable (1 local et 1 séquentiel))

Ces élèves imaginent que plus la résistance est grosse, plus l'intensité augmente. 10 d'entre eux emploient ce raisonnement sur le circuit simple comme sur une branche dérivée, 4 uniquement sur le circuit simple, 2 uniquement sur la branche. Cette observation illustre combien l'acquisition d'une représentation nouvelle est fragile et nécessite des étapes.

En résumé, ce raisonnement ne paraît pas être un particularisme local, mais peut-être national, puisqu'il ne se rencontrerait pas en Belgique. Il ne disparaît pas aussi facilement qu'une première estimation aurait pu le laisser croire. Le questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité peut faire apparaître un net retour en arrière lorsque le circuit comporte plus de récepteurs. L'existence de suivis a permis une analyse plus fine des évolutions personnelles. A ce stade de l'apprentissage la question de l'énergie reste d'actualité...

Nous verrons plus loin dans l'apprentissage, alors que toutes les hypothèses auront été mises en oeuvre et auront joué un rôle, que les élèves ont une meilleure représentation du conducteur résistant et ces prévisions tendent à disparaître.

2 - b – Evolution des représentations locales et séquentielles

Lors des différents passages du questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité nous avons recueilli des réponses comme celles résumées dans le tableau de la page précédente. Pour toutes les populations, le raisonnement le plus représenté, à plus de 50 %, est le **raisonnement séquentiel**, aux multiples conséquences dont la circulation en amont d'un interrupteur ouvert. Ensuite on trouve le raisonnement local (de 17 à 50 %), puis le raisonnement correct et, pratiquement inexistant, le raisonnement à courant constant.

Nous allons reprendre cet état initial en termes de conservation du débit : les raisonnements locaux et séquentiels ne la respectent pas alors que les raisonnements à courant constant ou corrects la respectent.

Evolution de la conservation du débit sur le circuit série fermé

Conservation du débit Date de l'observation	violée	respectée
Questionnaire préliminaire	64 / 78 82 %	14 / 78 18 %
En fin de seconde	35 / 145 24 %	96 / 145 66 %
En fin de 1 ^{er} S	0 / 20 0 %	19 / 20 95 %

Nous avons déjà analysé les variables expliquant une évolution favorable entre la classe de seconde et celle de première S, de même qu'entre l'état initial et final de seconde toutes les hypothèses ayant été mises en oeuvre. Cette observation se retrouve à chaque essai, par exemple lors de l'expérimentation par le chercheur, un

questionnaire préliminaire de J.L.Closset avait été passé en début d'année aux 65 élèves de deux classes, puis l'évaluation s'est déroulée avec le questionnaire de D.M.Shipstone (1988). Voici l'évolution au niveau
- des raisonnements empruntés :

Raisonnement	local	séquentiel	A C.Constant	systémique
Avant enseignement	13,4 %	67 %	18 %	1,5 %
Après enseignement	0 %	16,7 %	44 %	39 %

- regroupement des raisonnements en fonction de la conservation du débit :

Conservation du débit Date de l'observation	Violée	respectée
Avant enseignement	80 %	20 %
Après enseignement	17 %	83 %

Voici maintenant des observations un peu plus fines réalisées à partir des documents du chercheur et de l'expérimentatrice de Grenoble lors des suivis effectués la dernière année d'expérimentation. Nous ne disposons pas d'observations avant enseignement. Nous en avons à différents stades de l'apprentissage du concept d'intensité, fruits de l'effet combiné des quatre hypothèses. Les premières traces se situent après enseignement de la circulation et avant celui de l'intensité, lors du questionnaire préliminaire à cet enseignement :

Observations lors du questionnaire préliminaire du raisonnement sur le circuit simple et sur une branche montée en dérivation

Circuit simple Branche	Local		Séquentiel		A Courant Constant		Correct	
	Brive / 34	Grenoble / 21	Brive / 34	Grenoble / 21	Brive / 34	Grenoble / 21	Brive / 34	Grenoble / 21
Local	4 12 %	1 5 %	1	0	1	0	0	0
Séquentiel	0	2	9 26 %	11 52 %	1	0	0	1
A C.Ct.	1	0	2	0	0	0	0	0
Correct	2 + 1 ?	0	3 + 1 ?	3	0	1	9 26 %	2 9,5 %

A ce stade de l'apprentissage, les élèves empruntant le même raisonnement sur le circuit simple et sur une branche montée en dérivation étaient 22 / 34, soit 65 % de la population de Brive et 14 / 21 soit 67 % de la population de Grenoble. A Brive, la plus forte cohérence se trouvait partagée entre le raisonnement séquentiel et le raisonnement correct (9 / 22 = 41 % des élèves cohérents pour chacun). A Grenoble le paysage est différent : 11 / 14 des élèves cohérents le sont avec le raisonnement séquentiel, soit 78 % d'entre eux.

Pour ces deux populations, après un premier enseignement, il y a disparition du raisonnement local. En observant pour un circuit mixte le raisonnement sur la branche principale comparé au raisonnement sur la branche dérivée, la plus forte cohérence se trouve au niveau du raisonnement correct pour 29 % de la population de Brive et 16 % de celle de Grenoble, comme le montre le tableau ci dessous :

Observations lors du réinvestissement

du raisonnement sur la branche principale comparé au raisonnement sur la branche dérivée

Circuit principal Branche	Local		Séquentiel		A Courant Constant		Correct	
Population	Brive / 34	Grenoble / 25	Brive / 34	Grenoble / 25	Brive / 34	Grenoble / 25	Brive / 34	Grenoble / 25
Local	0	0	0	0	1	0	0	0
Séquentiel	0	0	1	1 + (5)	2	(2)	0	0
A C.Ct.	0	0	0	0	0	1	0	0
Correct	0	0	1	4 + (2)	19 56 %	8 + (5) 32 < % <52	10 29 %	4 16 %

Entre parenthèses, ce sont des élèves au raisonnement instable de l'académie de Grenoble : sur la branche principale, leur raisonnement est soit séquentiel, soit à courant constant et sur la branche dérivée tantôt séquentiel, tantôt correct.

La réponse la plus fréquente de ces deux populations est composée d'un raisonnement correct sur la branche dérivée dans laquelle la valeur de la résistance change : l'intensité évolue en tout point de cette branche. Par contre cette évolution serait sans incidence sur la branche principale et donc le générateur considéré à débit constant. Cette réponse a été fournie par 56 % de la population de Brive et entre 32 et 52 % de celle de Grenoble, selon la question posée.

On peut revoir ces observations à travers la grille d'analyse précédente, c'est à dire rassembler dans un tableau les raisonnements conservant la continuité du débit et ceux qui la violent, et noter l'évolution du raisonnement cohérent utilisé sur le circuit simple et une branche dérivée avant enseignement, puis sur le circuit principal et une branche dérivée après enseignement.

**Tableau de l'évolution des raisonnements cohérents
analysée par rapport au respect de la continuité du débit**

Observation	Continuité du débit	Violée	Respectée	% raisonnements cohérents
Avant enseignement		25 / 55	11 / 55	36 / 55
Elèves empruntant le même raisonnement sur le circuit simple et la branche		45 %	20 %	65 %
Après enseignement		2 / 59	41 / 59	43 / 59
Elèves empruntant le même raisonnement sur le circuit principal et la branche		3 %	70 %	73 %

Nous observons à ce stade de l'apprentissage une progression du respect du débit chez la moitié des élèves dont nous avons pu suivre l'évolution à ce niveau de la séquence.

Toutes ces observations vont dans le sens d'un progrès vers la représentation d'une continuité du débit le long d'un circuit simple, puis le long d'une branche principale ou dérivée d'un circuit mixte. On assiste à une progression simultanée du nombre d'élèves employant ce raisonnement quelle que soit la place dans un circuit d'éléments montés en série. Ce progrès n'est sans doute pas, rappelons-le, le résultat de cette seule hypothèse, toutes ayant été mises en oeuvre simultanément. Sur cet exemple, on peut par exemple penser à un effet conjugué du travail avec l'analogie de la chaîne de vélo, illustration du transfert d'énergie au sein d'un système en interaction.

III – Recherche d'effets en lien avec l'approche qualitative

La séquence demande aux élèves un travail essentiellement qualitatif pendant la plus grande partie de son déroulement : questionnaires, justifications, observations sont qualitatifs. Il en est de même de la nature des explications fournies utilisant des images et des analogies du circuit. Qu'en attendions-nous ?

1 – Attentes d'une approche qualitative du fonctionnement du circuit et des concepts permettant de le décrire

D'une approche qualitative, nous attendons la formation de représentations mentales, la construction de modèles qui permettraient :

- la prise de sens de chaque concept et l'acquisition de propriétés conduisant à
- l'amélioration de la compréhension du fonctionnement du circuit, et finalement à
- un meilleur usage du formalisme.

Cela devrait pouvoir s'observer au niveau de la nature des **justifications** fournies, en particulier pour le **rôle du conducteur résistant** : une représentation de ces deux aspects de la résistance devrait permettre à l'élève de mieux prévoir :

- l'évolution sur le débit provoquée par l'ajout ou le retrait d'une résistance, en série ou en dérivation ;
- le partage du débit à un nœud selon les valeurs relatives des résistances présentes dans les différentes branches.

Nous en attendons également une prise de conscience de l'interaction entre le générateur et son circuit, donc moins de générateur à débit constant.

2 – Observations en lien avec l'approche qualitative

2 - a – Vocabulaire utilisé pour justifier

a - 1 – Expérimentation du chercheur, à Brive, année 1998-1999

Nous disposons du vocabulaire utilisé par les élèves au cours de cet essai de la séquence, pour justifier leurs prévisions au sujet de l'intensité :

- avant tout enseignement,
- lors du premier réinvestissement après un premier enseignement puis
- lors du test circulation après un deuxième enseignement, et
- au questionnaire préliminaire à l'intensité, puis au réinvestissement.

a1.1 - Vocabulaire utilisé en réponse au questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'électricité

Ils sont 37 / 68 à n'utiliser que le mot **courant** dans leurs justifications, parfois associé à une idée :

d'énergie : « une pile dégage toujours de l'énergie, sauf si elle est usée ou détériorée »

d'électricité : « la pile est un générateur d'électricité, donc fournit du courant. »

Quelques élèves, plus particulièrement en seconde scientifique ont une idée plus précise et parlent :
de charge : « il y a du courant dans BC car il y a les charges + et - qui se rencontrent. »
d'électrons qui ne peuvent pas « se mettre en route », ou « circuler » lorsque le circuit est ouvert.

a1.2 – Vocabulaire utilisé lors du réinvestissement

Le cours avait porté sur la nature électronique du courant, la circulation, et parlait un peu d'énergie. On observe :

- 11 / 68 élèves conservent le terme de **courant** ;
- 15 / 68 parlent d'**électrons freinés** ou **ralentis** ;
- 10 / 68 parlent d'**énergie qui passe** ;
- 10 / 68 utilisent le mot **intensité**.

A ce stade on observe une **diversification**, pas toujours au profit de termes ayant un contenu mieux défini que la vague notion de courant.

a1.3 – Vocabulaire utilisé au test circulation

Avant le test, ils ont mis en oeuvre l'analogie de la chaîne de vélo, illustrant le transfert d'énergie ainsi que le modèle de la circulation, définie comme déplacement de charges. Elle devrait avoir acquis des propriétés préliminaires à la construction du concept d'intensité. Quel est alors le vocabulaire mis en oeuvre ?

On trouve encore des explications en terme de **courant** chez 6 / 68 élèves tandis que 6 / 68 parlent de **mouvement d'électrons** tel Hervé pour qui :

« Les électrons susceptibles de participer à une circulation sortent du générateur jusqu'à l'interrupteur ouvert. Leurs mouvements sont ordonnés car lorsqu'ils arrivent à l'interrupteur les électrons arrêtent de circuler. »

4 / 68 élèves parlent d'**énergie**, ou laissent supposer un raisonnement énergétique telle Elodie qui écrit en parlant d'un circuit mixte :

« Le circuit est monté de façon à ce que le générateur fournisse la même chose à toutes les lampes »

Des élèves ont des propos que nous pouvons accepter comme corrects, telles Emmanuelle et Virginie pour qui *« Dans un circuit en dérivation, la deuxième ampoule propose un deuxième chemin aux électrons. Dans un circuit en série les ampoules sont des freins à la circulation. »* Ce sont 2 / 68 élèves qui parlent de chemin pour des ampoules en dérivation et 10 / 68 qui emploient le mot frein avec des explications en terme de courant, d'électrons ou même d'intensité lors de cette première approche...

Voici résumé dans un tableau les observations qui précèdent :

Tableau montrant l'évolution du vocabulaire utilisé

l'étude porte sur 2 classes, soit 68 élèves :

Etape d'apprentissage Vocabulaire	Avant enseignement	Après un premier enseignement sur le circuit	Lors du test circuit et circulation
Courant	37 / 68 54 %	11 / 68 16 %	6 / 68 9 %
Dont avec une idée d'énergie :	6 / 68 9 %	5 / 68 7 %	1 / 68 2 %
Electricité	5 / 68 7 %		
Electrons ou charges	8 / 68 12 %		
Mouvement d'électrons			6 / 68 9 %
Electrons freinés ou ralentis		15 / 68 22 %	9 / 68 13 %
Energie « qui passe »		10 / 68 15 %	4 / 68 6 %
Intensité		10 / 68 15 %	11 / 68 16 %
Ampoules sont des freins			10 / 68 15 %
Dérivation propose un chemin			2 / 68 3 %

La diversification se poursuit au détriment du terme « courant » avec apparition d'un début de représentation de l'influence du conducteur résistant sur la circulation. Les réponses en terme de courant avec une notion d'énergie tendent à disparaître.

a1.4 - Vocabulaire utilisé au questionnaire préliminaire à l'intensité (circuit simple)

Les élèves qui ont une prévision correcte l'expliquent pour 11 d'entre eux avec l'image du frein, tel

Michel : « la résistance est un frein au passage du courant. »

Cette idée se trouve partagée par des élèves qui l'expriment avec d'autres mots :

- 4 élèves emploient le mot résister, telle

Muriel : « une résistance plus importante résiste à l'intensité qui donc diminue. »

- et deux emploient des périphrases :

Cédric : « si la résistance est plus grande, le courant a plus de mal à circuler, et l'intensité baisse. »

Fabienne : « la valeur de la résistance a augmenté, elle ralentit donc le mouvement des électrons, donc l'intensité diminue. »

Remarque : ces mots employés spontanément par l'élève, expression de sa représentation du phénomène à l'aide d'un vocabulaire qui lui est familier, sont précieux pour le chercheur. Il peut les employer comme des voies d'accès, des étapes qui aident l'élève à se faire une idée plus proche de celle du physicien, et qui lui rendent le monde plus intelligible.

A ce stade, ce sont 17 / 68 élèves qui se représentent la résistance comme un frein à la circulation, alors que 6 se contentent d'affirmer qu'elle diminue l'intensité.

a1.5 – Vocabulaire utilisé au réinvestissement (circuit mixte)

Le mot **frein** est maintenant utilisé par 22 / 68 élèves, ceux qui continuent à l'employer (8 / 11) et 14 élèves pour qui c'est un progrès.

Qu'en est-il de la représentation d'une modification du circuit par ajout ou retrait d'une branche en dérivation ? Au questionnaire préliminaire Emmanuelle parlait de **chemin**. Cette image se trouve maintenant exprimée par deux élèves :

Céline : « l'intensité augmente car on a donné un chemin en plus à l'intensité. »

Guillaume : « dans le chemin où il y a R_2 il y a moins d'intensité qui passe, alors le reste passe par le chemin où il y a R_1 . »

L'aspect conducteur des résistors ne semble pas avoir autant marqué l'élève que l'aspect frein, malgré la dénomination de « conducteur-résistant ». Ces observations avaient été faites avant la mise au point définitive de la séquence. Toutefois une évolution similaire a pu être observée à l'occasion des suivis de l'expérimentation 1999-2000.

a2 – Expérimentation 1999-2000, classe du chercheur (35 élèves)

Le premier enseignement, après le questionnaire préliminaire, a permis à près de la moitié des élèves de se représenter la **circulation** le long d'un circuit simple assez clairement pour l'exprimer comme un **mouvement ordonné de charges**, parfois avec l'image d'une **chaîne**. Si elle se brise en un point, le mouvement ordonné s'interrompt, ce qui ne correspond plus à une circulation.

Après le réinvestissement utilisant des circuits avec deux lampes, montées soit en série, soit en dérivation, on a pu constater que 9 / 35 élèves ont commencé à se représenter la résistance comme un frein à la circulation.

Lors du test après enseignement de la circulation, l'ajout d'une lampe en série est l'occasion pour 4 élèves de réinvestir la notion de frein à la circulation tandis que 3 autres se contentent de prévoir une diminution de l'éclairement, soit 7 / 17 élèves.

Ces représentations se retrouvent quelques mois plus tard, par exemple en fin de seconde, la population du chercheur a souvent justifié ses prévisions en utilisant des arguments inexistant ailleurs. Par exemple :

- sur le **circuit série**, modifié par ajout ou retrait d'une résistance, il y a plus de la moitié des élèves pour utiliser la métaphore du **frein** : un dipôle de plus en série c'est un frein de plus à la circulation et réciproquement. On trouve cette justification dans 20 prévisions correctes sur 24, soit plus de 80 % de celles-ci et deux prévisions fausses liées à un générateur à débit constant ;

- sur le **circuit avec dérivation**, modifié par l'ajout ou le retrait d'une branche, c'est la métaphore du **chemin** : un dipôle de plus en dérivation c'est un chemin supplémentaire pour la circulation et réciproquement. On rencontre cette justification dans 15 prévisions correctes sur 22, soit 70 % de celles-ci et aucune prévision fausse.

L'image du frein est utilisée par 22 / 35 élèves, soit 63 % et justifie 80 % des réponses correctes ; l'image du chemin est employée par 15 élèves, soit 43 % et justifie 100 % des réponses correctes. Ces représentations sont assez fortes pour se retrouver en fin de 1^oS.

Nous avons observé qu'il fallait bien toute la durée de la séquence pour que l'élève s'approprie ces images, mais une fois assimilées, elles se trouvent largement employées à bon escient. Elles sembleraient les aider à se représenter le double aspect du conducteur-résistant, résistant placé en série, conducteur lorsqu'il est monté en dérivation. Cette observation tendrait à justifier notre approche qualitative s'appuyant sur des images et des analogies.

2 - b – Représentation d'un nœud.

Nous avons trouvé près de la moitié des élèves entrant en seconde violant la loi des nœuds, et pour ceux qui envisagent un partage il est généralement équitable, le plus souvent en lien avec une représentation locale ou séquentielle du débit. Une meilleure représentation de la circulation et une meilleure compréhension du rôle du conducteur - résistant peuvent permettre d'imaginer que le partage, d'égal devienne différencié. Observons l'évolution de la représentation d'un nœud :

Etat initial

A l'entrée en seconde, en 1997 dans les classes du chercheur, la loi des nœuds est violée par 30 / 68 élèves, soit 44 %. Est-ce un particularisme local ?

Lors de l'expérimentation de la séquence dans d'autres académies, nous avons observé les réponses au questionnaire préliminaire à l'intensité, c'est à dire après l'enseignement de la circulation et de la d.d.p.. Cette loi était en moyenne ignorée par la moitié de la population interrogée :

Représentation d'un nœud avant enseignement de l'intensité en classe de seconde

Loi des nœuds Population	Partage différencié	Partage égal	Violée	Sans réponse
Brive 34 élèves	14 / 34 41 %	11 / 34 32 %	8 / 34 24 %	1 / 34 3 %
Grenoble 28 élèves	3 / 28 11 %	3 / 28 11 %	15 / 28 54 %	7 / 28 25 %
Lille 16 élèves	1 / 16 6 %	4 / 16 25 %	3 / 16 19 %	8 / 16 50 %
Moyenne 78 élèves	18 / 78 23 %	18 / 78 23 %	26 / 78 33 %	16 / 78 20 %

Le rôle d'un nœud n'a rien d'intuitif, le collège ne l'a pas mis en place et parmi les élèves qui en ont une idée, la moitié imaginent le partage équitable.

Evolutions observées

A Brive, à l'occasion des suivis nous avons observé l'évolution des représentations du nœud, après un premier enseignement de cette loi :

Elèves ayant modifié leur réponse après un premier enseignement de cette loi sur le circuit avec dérivations (1/2 classe – 17 élèves)

Raisonnement antérieur	Loi inconnue	Loi inconnue	Loi connue Partage =	Loi connue Partage ≠
Nouveau raisonnement	Partage égal	Partage ≠	Partage ≠	Partage =
Nombre d'élèves	3 / 17	5 / 17	6 / 17	3 / 17

Représentation du partage à un nœud après ce premier enseignement

sur le circuit avec dérivations
(classe entière – 34 élèves)

Loi des nœuds	Partage différencié	Partage égal	Violée
Population			
Brive	22 / 34	11 / 34	1 / 34
34 élèves	65 %	32 %	3 %

Ces observations tendent à montrer que l'ignorance de cette loi, manifestée par les représentations mises en place par les élèves au niveau de ce que le physicien nomme nœud, ne constituent **pas un réel obstacle**. Après un premier enseignement de la circulation avec conservation du débit il ne reste qu'une élève sur 34 pour la violer. Les 8 autres qui l'ignoraient s'en servent, dont 5 avec une répartition différente du débit dans les branches.

On peut également remarquer que le partage équitable entre les branches se rencontrait chez 11 élèves dont le raisonnement dans la branche était local (4 / 11), ou séquentiel (5 / 11), ou à courant constant (2 / 11). Pour ces élèves soit la résistance est sans influence sur le débit, soit lorsqu'elle en avait une, elle était localisée ou bien au niveau de celle-ci, ou bien à partir d'elle. Avant, le courant ne sachant pas ce qui l'attend se répartit de façon identique.

Au cours de l'essai 1998-99, lors du questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité, la loi reste violée par 17 / 68 élèves (25 %). Après un premier enseignement avec l'image de l'île au milieu d'un cours d'eau, il y en a encore 8 / 65 pour qui la loi n'est pas acquise. Un mois plus tard, il ne reste plus qu'une seule élève au raisonnement local-énergétique pour la violer. A la question précise portant sur le débit de part et d'autre d'un nœud, ils répondent comme le physicien.

Après le travail sur le concept d'intensité et la loi des nœuds, lors d'un essai de **réinvestissement sur le circuit mixte**, certains élèves cherchent plus à traduire la continuité du débit du générateur que sa conservation à un nœud, et ce sont 26 / 68 réponses (38 %) **qui violent** la loi au niveau d'un ou même plus souvent des deux nœuds :

- 21 élèves au **raisonnement correct dans la branche où R varie**, sans incidence ni sur l'autre branche dérivée, ni sur le circuit principal : la loi est violée aux deux nœuds ;
- 5 élèves aux représentations plus diverses, comportant au moins un raisonnement séquentiel et où la loi est violée à un seul nœud.

La loi est respectée par 41 / 68 élèves (60 %), dont les principaux raisonnements sont :

- 15 élèves au **raisonnement correct** dans la branche où R varie et qui imaginent une interaction avec l'autre branche dérivée pour maintenir le débit du générateur constant ;
- 9 élèves au **raisonnement correct** dans la branche où R varie et dans la branche principale, le courant restant constant dans l'autre branche dérivée ;
- 8 élèves au raisonnement entièrement compatible avec **un raisonnement correct** ;

(Ces trois représentations correspondent à des raisonnements corrects au moins sur la branche où R varie, parfois aussi sur la branche principale et même sur l'ensemble du circuit. Ces élèves ont à la fois une bonne connaissance du conducteur-résistant et de son effet sur la circulation et une maîtrise suffisante de la loi nœuds pour chercher à la respecter.)

- 6 élèves maintenant le débit constant partout ;
- 3 élèves maintenant le débit du générateur constant avec des raisonnements locaux au niveau d'une ou des deux branches dérivées.

La loi était donc connue de tous les élèves, mais son niveau d'acquisition se limite pour certains aux exemples rencontrés, alors que d'autres tendent vers une maîtrise de cette connaissance qui, ajoutée à celle du conducteur - résistant se trouvent réinvesties lors de l'étude d'un circuit mixte.

Une fois la loi admise, ils sont 39 / 68 élèves (57 %) à prévoir un **partage équitable** et 28 / 68 (41 %) à l'imaginer en fonction des branches. Ce partage équitable peut être l'association familière de deux notions, celle de partage et celle de parts égales ; on peut toutefois remarquer que cette représentation est compatible avec le raisonnement local de Céline : « *l'intensité est la même dans les fils* », comme avec un raisonnement séquentiel.

La séquence a permis à l'élève de réfléchir à ce partage, en lien avec le travail qualitatif sur le rôle du conducteur résistant. Lors d'un réinvestissement portant sur une demi population (30 élèves) :

- 3 élèves restent sans réponse ;
- 18 élèves prévoient un partage différencié (60 %) ;
- 9 le prévoient équitable (30 %).

L'évolution attendue s'est produite et permet à 60 % des élèves de fournir des prévisions correctes.

Evolution observée au cours des suivis de l'année scolaire 1999-00

Nous disposons des représentations des élèves de Brive et Grenoble à trois stades d'apprentissage : au questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité, au réinvestissement, puis en Mai 2000. Les voici rassemblées dans un tableau :

Loi des nœuds Questionnaire	Partage différencié	Partage égal	Violée	Sans réponse
Préliminaire (circuit dérivation)	17 / 62 élèves 27 %	14 / 62 23 %	23 / 62 37 %	8 / 62 13 %
Réinvestissement (circuit mixte)	33 / 62 53 %	19 / 62 31 %	3 / 62 5 %	7 / 62 11 %
Mai 2000 (circuit dérivation)	28 / 62 45 %	6 / 62 10 %	6 / 62 10 %	22 / 62 35 %
Mai 2000 % de réponses	28 / 40 réponses 70 %	6 / 40 rép. 15 %	6 / 40 rép. 15 %	

La comparaison des réponses de Brive et de Grenoble paraît délicate en raison du fort taux d'absents, et de réponses incomplètes au questionnaire final. On peut toutefois noter 70 % des réponses au partage différencié et 15 % au partage équitable. Des élèves ont acquis non seulement la conservation du débit à un nœud mais aussi une répartition dans les branches en lien avec les dipôles qui s'y trouvent, dont l'effet s'étend au moins à la branche. Mais, sur les circuits mixtes, cette représentation se trouve entrer en concurrence avec celle plus tenace du débit constant du générateur ce qui explique qu'elle reste facile à violer après apprentissage. De plus, lorsqu'il y a des calculs, on s'aperçoit que :

- par manque d'outils disponibles ils peuvent utiliser la loi et font l'hypothèse gratuite d'un partage égal, alors que sur des questions qualitatives ils le prévoient différencié ;
- d'autres hypothèses plus fortes, comme le générateur à débit constant, combinées à de vraies lois physiques les conduisent à fournir des résultats qui la violent, alors qu'ils l'ont utilisée pour des prévisions qualitatives.

Etat de la connaissance du nœud, en fin d'apprentissage, lors de l'évaluation en fin de seconde, en Mai 99 avec la demi-population de 4 classes (les autres ayant la question sur le circuit série) et 3 enseignants. Nous regardons les réponses portant sur la circuit avec deux dipôles en dérivation (Question III, annexe VI.12) :

Partage Réponses de	Correct (1)	En sens contraire (2)	Différencié (1) + (2)	Egal	Sans réponse
64 élèves de 4 classes	30 / 64 élèves 47 %	10 / 64 16 %	40 / 64 62 %	21 / 64 33 %	3 / 64 5 %

Ces réponses révèlent une connaissance du conducteur résistant, justifiée en terme de frein par certains et un progrès dans la représentation de l'effet de ce dipôle sur le circuit, que l'on peut imaginer en lien avec le travail qualitatif fourni, qui permet à près de la moitié de ces élèves de fournir une prévision correcte.

2 - c – Représentation du générateur et du circuit

Avant enseignement, pour l'élève, la caractéristique d'un générateur, ce serait le courant qu'il débite. Cette « propriété » n'a jamais été utilisée que par une minorité d'élèves :

- lors de l'essai 1998-99, seuls 5 / 68 élèves ne l'ont jamais employée ;

- au cours de l'expérimentation 1999-2000 seulement 2 / 62 élèves des populations de Brive et Grenoble.

Cette expérimentation nous permet de suivre l'évolution du raisonnement sur le circuit principal à 5 étapes de l'apprentissage.

Evolution de la représentation du débit du générateur, lors de l'expérimentation 1999-2000 : les observations sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Réponses concernant le débit du générateur
réponses de 62 élèves des deux académies

Etape d'apprentissage : Débit du générateur	Après enseignement circulation	Q. préliminaire intensité	Réinvestissement Circuit mixte	Test I et U	Mai 2000
Adapté au circuit	10 / 62 16 %	11 18 %	14 23 %	41 66 %	23 37 %
En fonction de la question	0	2	3	4	11 sauf circuit ouvert 18 %
Constant	45 / 62 73 %	47 76 %	43 69 %	12 19 %	23 37 %
Elèves absents	7	2	2	5	5

Avant enseignement, il se trouve 10 / 62 élèves à établir un lien entre le débit du générateur et son circuit, idée abandonnée par trois d'entre eux lors du questionnaire préliminaire à l'enseignement de l'intensité : l'étude de la circulation avec l'image de la chaîne semble avoir peu fait évoluer les représentations.

Lors du réinvestissement sur les circuits mixtes, ils n'y a que 5 élèves qui conservent le lien exprimé, lors du questionnaire précédent, entre le générateur et le reste du circuit. Par contre 9 nouveaux élèves répondent avec un générateur dont le débit est adapté au circuit. Les premières représentations apparaissent peu stables.

Ensuite le travail sur les circuits mixtes semble avoir permis à certains élèves d'entrevoir le circuit comme un système en interaction : c'est le seul stade de l'apprentissage où il y a plus de réponses considérant débit du générateur variable que de générateur à débit constant... mais cette représentation n'a pas été stabilisée sur le long terme pour tous. Elle ne se trouve conservée que par 20 élèves et 3 au raisonnement précédent incertain (qui semblent avoir construit une représentation correcte). 11 élèves imaginent bien un générateur à débit variable en circuit fermé, mais raisonnent avec un générateur à débit constant sur le circuit ouvert... dont 8 au raisonnement précédent correct (et 3 raisonnaient toujours avec un débit constant partout avant).

Evolution de la représentation du débit du générateur, lors de l'essai 1998-1999

Avant enseignement 29 / 68 élèves avaient eu l'occasion d'exprimer leur représentation d'un générateur à débit constant. Ainsi pour Laure l'intensité qui traverse le circuit est la même qu'il soit ouvert ou fermé :

« Interrupteur ouvert, pareil que s'il est fermé, car dans un circuit série l'intensité est la même en tout point du circuit. »

Au réinvestissement, après un début de construction du concept d'intensité cette représentation est conservée par 14 élèves, abandonnée par 15 et au total mise en oeuvre par 43 / 68 élèves.

Au test final le générateur à débit constant se trouve utilisé :

- avec le raisonnement du physicien seulement sur la branche la branche où R varie par 23 élèves ;
- utilisé pour répondre à une question alors que l'interaction circuit-générateur est utilisé pour répondre à une autre par 15 élèves ;
- utilisé pour prévoir l'interaction avec la deuxième branche par 6 élèves ;
- utilisé avec un raisonnement à courant constant partout par 7 élèves.

L'intensité qui traverse l'alimentation stabilisée varie chez 10 élèves qui approchent une vision systémique (mais sans l'usage de la d.d.p., d'où un sens de variation parfois contraire à celui du physicien) et chez 15 élèves qui utilisent, selon la question posée, tantôt ce raisonnement, tantôt considèrent un débit constant du générateur. Les autres raisonnent toujours avec un générateur à débit constant, soit 43 / 68 (63 %).

Le générateur et le circuit (1998-1999)

Sur le circuit simple, 24 / 68 élèves (35 %) utilisent un raisonnement considéré correct, le débit du générateur évoluant avec la valeur de la résistance introduite à ses bornes.

Sur le circuit mixte, 40 / 65 élèves réinvestissent facilement un raisonnement correct sur une branche dérivée (62 %) et 42 % des élèves s'arrêtent là. 30 % parviennent à imaginer une interaction limitée à l'autre branche, le courant de l'alimentation restant constant et 22 % imaginent l'interaction entre la branche et le circuit principal seul.

Le générateur à débit constant est une propriété qui pilote l'interaction entre les branches pour 30 % des élèves, d'autres violent la loi des nœuds.

Il arrive que le raisonnement varie selon la question posée. Peu d'élèves imaginent tout le système en interaction : ils sont 10 / 68 et le plus souvent n'ont pas répondu à toutes les questions.

Conclusion

Il semblerait que le raisonnement à débit constant du générateur constitue un réel obstacle empêchant l'élève d'accéder au raisonnement systémique du physicien. Cette représentation va de pair avec l'impossibilité d'envisager une interaction entre les différents éléments constitutifs d'un circuit. Nous avons observé une lente remise en cause de cette propriété tout au long du travail qualitatif, mais aussi la fragilité des acquis. Nous mesurerons mieux le travail effectué avec l'évaluation sur le long terme en 1^{er}S ainsi qu'en prenant des repères extérieurs à la séquence.

Nous tenons à signaler cette observation, faite à l'occasion de l'option sciences expérimentales en 1^{er}S. Des élèves, telle Julie, exposaient à leurs voisines l'analogie entre le circuit une chaîne de vélo. Ces voisines, n'ayant pas appris avec la séquence, se trouvaient face à des observations inintelligibles, alors que pour Julie, elles étaient prévues !

A2 – Recherche des effets de la mise en oeuvre du bouquet d'hypothèses

Rappels

1 – Rappel des objectifs de connaissance poursuivis par la séquence

L'objectif principal est de permettre, à chaque élève, de se construire les concepts nécessaires à la compréhension du fonctionnement d'un circuit électrique simple. Pour cela, des étapes nous sont apparues nécessaires :

a – que l'élève possède une notion de la **circulation**, qui est loin d'être en place à son entrée en seconde :

- unicité du débit le long d'un circuit monté en série et le long d'une branche ;
- conservation du débit de part et d'autre d'un nœud (loi des nœuds) ;

b – qu'il mesure l'influence sur cette circulation de l'ajout ou du retrait d'une « **résistance** » en série, puis en dérivation. C'est à dire qu'il prenne conscience de son double comportement de conducteur et de résistance (chacun de ces aspects se trouve mis en évidence dans ces montages), en même temps que de l'interaction entre le générateur et le reste du circuit ;

c – qu'une **différence de potentiel** devienne nécessaire entre deux points d'un circuit pour qu'une circulation soit possible lorsqu'un conducteur les relie. Puis que l'élève lui attribue des propriétés, dont certaines peuvent être mises en parallèle avec celles de l'altitude ;

d – que l'élève constate l'interdépendance des évolutions des valeurs prises par ces trois concepts lorsque le circuit subit une modification. La loi d'Ohm en est une synthèse, admirable de simplicité, trop souvent réduite à une simple relation de proportionnalité. Notre approche qualitative voudrait permettre à l'élève de lui donner du sens

2 – Rappel de l'état initial, avant enseignement

Les concepts du physicien sont dépourvus de sens pour la majorité des élèves qui, à l'entrée en seconde, raisonnent avec la notion de courant. Ce courant possède pour certains une connotation énergétique quand pour d'autres il est statique... Aussi lorsque la question posée est en terme :

- d'intensité, pour l'élève il peut s'agir de la force ou de la vitesse du courant... ;
- de d.d.p., que l'élève nomme plus volontiers tension, ou U, il répond avec des propriétés de l'intensité ($U_G = U_{fil} = \dots$). La notion de courant, intensité, énergie, se met à englober la d.d.p. qui n'existerait donc pas aux bornes du générateur en circuit ouvert ;
- de résistance, son influence sur la circulation est bien répartie entre les élèves. Une résistance en plus ou plus grosse élève le débit pour la moitié d'entre eux et l'abaisse pour l'autre moitié.

Nous allons donc rechercher si l'ensemble des moyens originaux mis en oeuvre a apporté une aide à la compréhension et à la formation de représentations. Observe-t-on entre la rentrée et la fin de l'année de seconde, pour les élèves ayant suivi la séquence, des progrès cognitifs ? Ceux-ci pourraient se manifester par l'emploi d'un **vocabulaire approprié**, des **explications qui ont du sens**, l'attribution de **propriétés spécifiques** à chaque concept qui conduiraient l'élève à des **prévisions différentes** se rapprochant du fonctionnement réel du circuit.

I – Recherche d'un progrès cognitif

1 – Recherche d'un progrès par appropriation du vocabulaire

Nous venons de rappeler l'hétérogénéité des représentations très matérialistes et énergétiques, le plus souvent dénuées de rapport avec les concepts de la physique. Comment les élèves en parlent-ils, après avoir appris avec la séquence ? L'observation en a été faite lors de l'expérimentation 98-99, dont voici les principaux résultats :

1 - a – Concept de circulation

L'évolution du vocabulaire employé pour parler de la circulation a déjà été analysée p.13. Nous avons inscrit dans un tableau les termes employés et leur fréquence à différents stades de l'apprentissage. Après un premier enseignement qui avait parlé de la nature électronique du courant, de circulation, encore peu d'énergie, nous avons noté une **diversification** mais pas toujours au profit de termes ayant un contenu mieux défini que la vague notion de courant.

Puis les élèves ont utilisé le modèle, qui a été défini comme déplacement ordonné de charges et qui devrait avoir acquis des propriétés de conservation utiles à la construction du concept d'intensité. Nous avons alors remarqué une diminution d'explications en lien avec l'énergie et l'utilisation d'un vocabulaire plus imagé (électrons, frein, chemin) ou plus scientifique (intensité).

1 - b – Concept de d.d.p.

Nous cherchons à observer l'évolution du vocabulaire employé pour parler de la différence de potentiel : nous disposons de celui utilisé lors du test après enseignement de la d.d.p., puis de celui employé lors du questionnaire final en Mai 99 :

Vocabulaire utilisé lors du test en cours de séquence (68 élèves)

Terme Etape d'apprentissage	d.d.p. aux bornes de	+ d.d.p. du, dans, au	autre
Test d.d.p.	22 / 68 32 %	32 / 68 47 %	13 / 68 19 %

Certains élèves alternent des expressions correctes et d'autres qui le sont moins : ce sont les plus nombreux (47 %). Ils sont en phase d'apprentissage.

Des élèves évitent toute appellation ou parlent de U... quand d'autres expriment une représentation étrangère au concept, telles : « *la tension se partage en parts égales dans les différents chemins* » ; « *la tension qu'envoie le générateur* » ; « *la tension arrive à un nœud* » ; « *la tension ne peut pas circuler* »...

Vocabulaire utilisé à la question II du test final (62 élèves)

Terme	D.d.p.	Tension	U	I	Pas nommé	Non justifié
Réponse						
Correcte	8 / 62 13 %	17 27 %	4	0	4	1
Fausse	2	8	10	2	2	1
Bilan : % de réponses correctes	8 / 10 80 %	17 / 25 68 %	4 / 14 28 %	0 / 2	4 / 6	1 / 2

Existerait-il un lien entre la dénomination et l'appropriation du concept ? Le terme d.d.p. essentiellement employé dans la population du chercheur (8 / 10), conduit majoritairement ces élèves à la réponse correcte, ainsi que ceux qui ont employé le terme de « tension » (68 %). Par contre, ceux qui se sont contentés du symbole semblent peu maîtriser le concept : seuls 28 % d'entre eux fournissent une réponse acceptable.

En fin d'année 40 % des élèves donnent une réponse correcte en employant une appellation correcte. 34 / 62 (55 %) réponses sont correctes dont 25 / 34 (74 %) sont justifiées en termes de d.d.p. ou de tension.

1 - c – Concept de résistance

Nous allons observer l'évolution de la prévision d'une intensité qui évolue dans le même sens que la valeur de la résistance, et, dans le même temps, la prise de sens du rôle de la résistance sur le débit, lors de l'essai 1998-99 par le chercheur :

Evolution de la représentation du rôle de la résistance (68 élèves)

Etape d'apprentissage	Questionnaire préliminaire à l'intensité	Après un 1 ^o enseignement de l'intensité	Test après enseignement des concepts I et U	Test final Mai 99 Question II
Réponse				
R > ; I >	31 / 68 46 %	17 25 %	2	1
R est un frein	11 / 68 16 %	22 32 %		26 38 %

On observe la diminution progressive de la prévision contraire à l'expérience, tandis que dans le même temps se développe l'image du **frein**. Au questionnaire préliminaire à l'intensité, elle est employée par 11 élèves sur 68 (15 / 68 l'avaient précédemment utilisée au sujet de l'ampoule).

Cette idée est partagée par des élèves qui l'expriment à l'aide d'autres mots : ils emploient **résister**, ou ils expliquent que « *le courant a plus de mal à circuler* » ou que « *la résistance ralentit donc le mouvement des électrons*. »

Ces mots, spontanément employés par l'élève dans un vocabulaire qui lui est familier, sont les témoins d'un essai de compréhension, de leur représentation du phénomène qui se rapproche peu à peu de celle du physicien.

Lors du réinvestissement le mot frein est employé par deux fois plus d'élèves. Qu'en est-il des prévisions lorsque la modification du circuit consiste à ajouter ou enlever une branche en dérivation ? Au questionnaire préliminaire un seul élève parlait de **chemin**. Cette image apparaît dans les justifications de deux élèves au test final. L'aspect conducteur des résistors ne semble pas avoir autant marqué l'élève que l'aspect frein, malgré le titre donné de « conducteur-résistant »

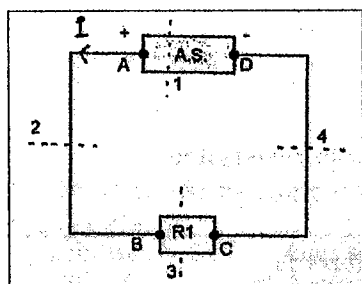
1 - d – Résumé des observations

Le vocabulaire employé par les élèves pour parler de chacun des concepts évolue vers des appellations qui sont compatibles avec celles du physicien. Elles se trouvent complétées par des justifications qui illustrent la représentation que s'en fait l'élève. Ce vocabulaire, avec le sens qui lui a été attribué, semble se retrouver lors du questionnaire final, ce qui indiquerait une stabilité dans le temps. Toutefois cet aspect du progrès cognitif n'est que celui d'une partie de la population. Les autres élèves ont évolué au niveau des prévisions, mais n'ont pas construit une représentation aussi clairement exprimable.

2 - Recherche d'un progrès au niveau d'explications qui prennent sens

Toutes nos questions sont assorties d'une demande de justification. Certaines n'apportent aucune information au chercheur, tandis que d'autres éclairent les prévisions. Avant l'enseignement de seconde, elles peuvent utiliser :

- l'énoncé d'une loi, telle : « dans un circuit série l'intensité est toujours la même » qui peut servir à justifier un raisonnement à courant constant et même un raisonnement local, quand elle n'évolue pas pour s'appliquer à un autre concept : « dans un circuit série, la tension est la même en tout point du circuit » ;
- une phrase qui éclaire une représentation, comme par exemple : « L'intensité en B est plus grande que C car la résistance pompe l'énergie » ou « l'intensité du courant en A est plus grande car il est plus près des pôles », ou encore « l'intensité en A est plus petite car la résistance R_2 a joué son rôle protecteur » ;
- une relation mathématique, telles :



$$\langle V_A = V_B \quad V_C = V_D \rangle$$

parfois avec une légende : « on compare les mêmes potentiels »

ou, lorsque R_1 est remplacé par R_2 : « car $R_2 > R_1$ »

ou le plus souvent : « $U = R.I$ »

Observons les nouvelles justifications fournies aux questionnaires passés en fin de seconde ou de première, qui indiquent quelle est la représentation, que se fait l'élève, de chaque concept.

2 - a - Justifications indiquant une représentation de l'intensité

Le schéma précédent était accompagné d'une demande de comparaison de l'intensité traversant le générateur, le conducteur AB, le récepteur BC et le conducteur CD. Voici la réponse de Caroline, en fin de seconde : « dans un circuit en série, le débit de charges est le même à l'entrée et à la sortie du générateur, à l'entrée d'un dipôle, est le même en tout point du circuit. » A une question portant sur l'intensité elle répond par le débit des charges, ce qui indique une représentation de ce concept. Le plus souvent la réponse est liée à la représentation de l'effet de la résistance, telle celle de Virginie : « dans ce circuit, R_1 freine les électrons partout dans le circuit, donc l'intensité est la même partout dans le circuit. »

2 - b – Justifications illustrant une représentation du rôle de la résistance

La question reprenait le même circuit avec une résistance dont la valeur avait changé. A cette question, 16 / 33 élèves de la classe scientifique du chercheur ont justifié une réponse correcte à l'aide du frein (et un, une réponse séquentielle), qui, selon l'élève : freine la circulation des électrons, ou des porteurs de charge, ou encore le débit d'électrons ou le courant. Muriel parle même de système en interaction :

« Quand, dans un circuit série la résistance diminue, l'intensité augmente. Il y a un frein en moins à la circulation des électrons. Un circuit est un système en interaction, le changement de valeur de R agit sur tout le circuit » quand Ana fait référence à l'analogie utilisée :

« Une résistance règle l'arrivée des électrons, donc l'arrivée d'électrons dépend de la valeur de la résistance (frein). La résistance freine les électrons partout dans le circuit (analogie de la chaîne de vélo). »

A la question III portant sur le circuit en série, sur dix élèves au raisonnement correct, huit le justifient en utilisant le mot frein, également employé par trois élèves ayant un autre raisonnement, soit 11 / 17 élèves, dont au moins deux qui n'avaient pas jugé utile d'en parler à la première question. Voici ce qu'écrivent :

Rachel : « Il y a deux freins au circuit, donc les électrons vont moins vite, ainsi l'intensité ... » et

Fabien : « Les deux résistances sont montées en série. Il y a donc maintenant deux freins à la circulation. Dans un circuit série l'intensité est la même partout. C'est un circuit en interaction. Si l'intensité est freinée quelque part, elle est freinée partout dans le circuit. »

En fin de première cinq élèves de la séquence et quatre ayant suivi l'option en 1^oS utilisent cette image mécanique tels : « il y a deux résistances, donc deux freins, donc beaucoup moins d'intensité que dans le I », ou « car il y a plus de résistances donc plus de freins à la circulation ». Elle est présente dans la justification de 8 / 15 réponses correctes et 8 / 20 réponses. Ces justifications sont en lien avec le travail effectué pour tenter de faire prendre conscience aux élèves de l'interaction entre le circuit et le générateur, interaction illustrée par la chaîne de vélo.

On a également observé le rôle de la résistance montée en dérivation. Par exemple en fin de seconde, dans la classe du chercheur 22 / 34 élèves prévoient une évolution correcte du débit et 4 / 34 en sens contraire. En fin de 1^oS, que restait-il de cette représentation sur le circuit avec dérivation : ajouter une résistance en dérivation élève le débit du générateur pour 8 / 19 élèves, qui le justifient par une phrase telle : « Le générateur doit fournir une intensité plus forte car il y a plus de chemins proposés aux électrons » et il diminue le débit pour 3 élèves, c'est à dire qu'il varie pour 11 / 19, soit 58 %.

2 - c – Justifications illustrant une représentation du concept de différence de potentiel

Nous avons rendu compte de l'évolution de l'appropriation d'un vocabulaire correct pour nommer le concept. Nous allons voir comment certains élèves expriment ses propriétés sur différents circuits.

c – 1 – Représentation de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série

Au cours de la séquence nous avons cherché à remplacer l'idée d'un partage du courant entre dipôles montés en série, par celle, suggérée par R.Millar (1993, a), qu'ils constituent des **diviseurs de tension**. Cette idée que la d.d.p. aux bornes du générateur se répartit aux bornes des récepteurs en série est reprise (lors du questionnaire passé en fin de seconde) dès la première question, sur le circuit simple, par exemple par Jessica :

« Dans un circuit série, les dipôles sont diviseurs de tension. » ;
puis sur le circuit série, par exemple par Mathias :

« Comme l'alimentation stabilisée distribue la tension et que le montage est en série, il joue le rôle de diviseur de tension : $U_{BC} + U_{DE} = U_{AF}$. »

Cette représentation se trouve réinvestie sur le montage mixte, par exemple par Claire : « MN et PQ sont montés en série et se divisent la d.d.p. »

De même, en cours d'apprentissage (évaluation d.d.p., Annexe V.55), lorsque le montage série devient un circuit simple par court-circuit du dipôle ED, Marie explique : « ED ne reçoit plus de tension ; AB reçoit toute la tension qu'envoie le générateur ».

Nous avons aussi cherché à associer à une résistance plus grosse, une d.d.p. plus forte, ce que nous retrouvons par exemple chez Claire : « Comme $R_2 < R_1$, il faut plus de tension à R_1 pour qu'elle fonctionne. » Cette idée se retrouve chez des élèves de cette classe, en fin de 1^oS « plus la valeur de la résistance est grande, plus la tension est importante. »

A la question II (Annexe VI.6 ou VI.11) où la valeur de la résistance change, nous avons trouvé des justifications rigoureuses, avec des analyses qui portent sur l'ensemble du circuit rencontrées par exemple chez : Aurélien : « R_1 est toujours alimentée par le même générateur, est toujours seule dans le circuit. Le générateur étant une alimentation stabilisée, la d.d.p. ne varie pas. », ou

Christophe : « la tension est inchangée au niveau du générateur, comme BC est au même potentiel que AD, la tension aux bornes de ces dipôles sont les mêmes, de plus on a changé R_1 en R_2 mais on n'a pas changé la tension. »

Ces analyses rigoureuses se retrouvent en fin de 1^oS chez des élèves ayant appris avec le chercheur, par exemple : « R_2 dans un circuit série, et seul dipôle, donc sa d.d.p. est la même que celle du générateur. Le générateur est une alimentation stabilisée, donc U_{BC} ne varie pas. »

c – 2 – Représentation de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en dérivation

Nous avons cherché à éviter la représentation construite avec des circuits à deux dipôles, en collège. Dans ce cas simple, les dipôles montés en dérivation possèdent non seulement la même d.d.p. à leurs bornes, qui est celle du générateur, ce qui n'est plus vrai si un récepteur se trouve en série avec la dérivation.

Lors du questionnaire final, à la question III (Annexe VI.12) avec deux branches dérivées, Aurélie explique : « Les dipôles étant en dérivation, la d.d.p. aux bornes des deux dipôles sont égales entre elles et au générateur. » Pour cette élève l'intention didactique semblait ne pas être passée... et sur le circuit mixte (Annexe VI.13) c'est elle qui explique : « Les deux dipôles R_1 et R_2 sont en dérivation (donc même d.d.p.) et ils sont eux même en série avec une autre R_1 , donc $(U_{R1} = U_{R2}) + U_1 = U$. »

La rigueur de la justification a été retrouvée parmi ces élèves en fin de 1^oS sur les circuits à deux dipôles, par exemple : « Dans un montage en dérivation, la tension est la même que celle du générateur (seul dipôle en branche principale) aux bornes de chaque branche. R_1 et R_2 sont les seuls dipôles dans leur branche respective. » Ces justification qui tiennent compte de la particularité du circuit, (3 / 19 élèves) montrent que ces élèves sont conscients des limites de la validité de la loi.

c – 3 – Des élèves utilisent la d.d.p. pour justifier une réponse

Il y a une prise de sens du concept par des élèves qui font spontanément appel à la d.d.p. pour justifier des prévisions. Par exemple, lors de l'évaluation en fin de séquence (Annexe V.72 - V.73) Célia écrit :

« Un même éclairage correspond à une même intensité et une même tension. »

En résumé, au cours de cette analyse, nous avons observé, chez des élèves, une évolution vers une représentation des concepts proche de celle du physicien : le courant n'est plus statique ; l'intensité n'est ni une vitesse, ni une force, mais un débit ; la résistance n'est plus un barrage ou un demandeur d'énergie mais un conducteur résistant. Jusque là ces concepts se résumaient, trop souvent pour l'élève, à un symbole mathématique, associé à un appareil de mesure pour I et U, et une unité.

Conclusion

Ces citations donnent accès aux représentations que certains élèves se sont construites des trois concepts visés par la séquence. Il apparaît des justifications inconnues jusque là : la résistance est perçue comme un frein au passage des électrons, ou mieux au débit d'électrons circulant dans le circuit. Ce circuit peut même être illustré avec l'analogie de la chaîne de vélo, et être décrit comme un système en interaction. La différence de potentiel existant aux bornes du générateur se répartit entre les récepteurs en série, tandis que des dipôles en dérivation possèdent la même.

Des élèves disposent maintenant d'une représentation de ces concepts, en lien avec celle de la circulation. Ils ont peu à peu attribué des propriétés aux concepts, qui les relient les uns aux autres : toutes choses égales par ailleurs, si R augmente, le débit diminue, si U augmente, le débit aussi. Tout paraît en place pour donner sens à la loi d'Ohm.

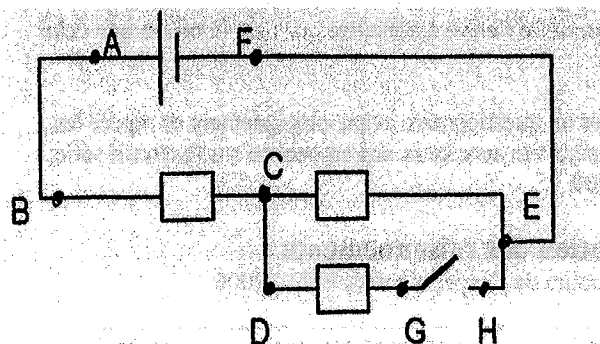
3 – Recherche d'un progrès par des prévisions différentes

Nous allons rechercher un progrès dans la connaissance de chaque concept, au niveau des prévisions faites sur chacun, à propos de différents circuits.

3 - a – Concept de circulation

L'acquisition de ce concept peut s'observer au niveau des prévisions sur le circuit ouvert. Nous avons déjà parlé des conséquences de la représentation d'un courant substantialisé, qui peut être statique et qui conduit généralement au moins la moitié des élèves entrant en seconde à prévoir l'existence d'un courant en circuit ouvert. Par exemple, lors de notre dernier essai à Brive, parmi les 35 élèves du chercheur, ils n'étaient que 14 % à fournir la réponse correcte et 83 % à imaginer du courant quelque part.

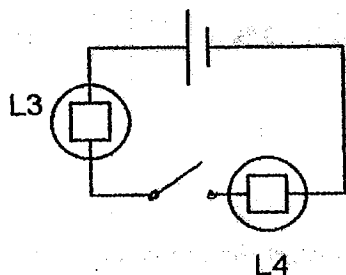
Après un enseignement du circuit (boucle fermée) et de la circulation (déplacement d'un ensemble de porteurs de charge) les prévisions évoluent. L'année 98-99 le stagiaire avait rencontré cette représentation, avant enseignement, chez 58 % des élèves entrant en seconde. Il a passé un questionnaire (Annexe VII) aux 96 élèves de la séquence en fin d'année, dont voici les questions portant sur des circuits ouverts :



1 – Dans quelle portion de circuit existe-t-il un courant ?

pour les éléments en circuit ouvert (DG et HE) :

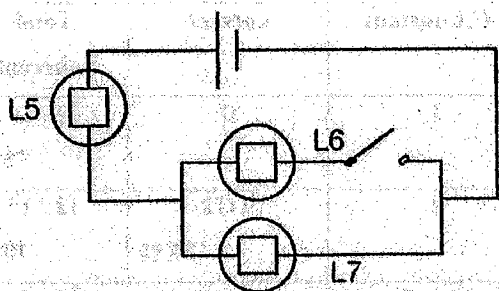
sans réponse	0
réponses fausses	9 / 96 = 9,4 %
réponses correctes	87 / 96 = 90,6 %



2 -Indiquer les lampes qui s'allument en les entourant

sans réponse	1
réponses fausses	3 / 96 = 3,1 %
réponses correctes	92 / 96 = 95,8 %

Les questions ne portent plus sur le circuit simple, comme avant enseignement, mais sur le circuit série où 96 % des réponses sont correctes, ou sur le circuit mixte où il y en a autour de 90 %, selon que ce sont des lampes ou des résistances.



Ces circuits offraient également l'opportunité de vérifier les connaissances sur le circuit fermé :

100 % de réponses exactes pour L₁ en série avec L₂ ;
91 % pour L₅ et L₇ du circuit mixte.

Les quatre cinquième des élèves ont progressé au point de réinvestir les connaissances, concernant l'existence d'une circulation le long d'une boucle fermée et son absence en cas d'ouverture, sur ces circuits plus complexes.

3 - b – Concept d'intensité

Un mode d'observation de la prise de sens de ce concept peut être la continuité du débit, tant à travers des éléments conducteurs montés en série, qu'an niveau d'un nœud.

b - 1 – Rappel de l'état initial

Avant enseignement, le raisonnement le plus représenté est le raisonnement séquentiel. Il y a également quelques élèves au raisonnement local. Ce sont des raisonnements qui présentent des discontinuités du débit, tout comme celui des élèves qui prévoient le partage de l'intensité (une intensité chargée d'énergie) entre les dipôles récepteurs montés en série.

b - 2 – Evolution de ces raisonnements

L'enseignement a insisté sur la continuité du débit, en remarquant que quelque soit le dipôle, générateur ou récepteur, comme il ne peut y avoir accumulation de charges, le débit mesuré à l'entrée est le même que celui mesuré à la sortie, ce qui peut même, mais difficilement, conduire l'élève à admettre qu'il est le même que celui qui traverse le dipôle, ce qu'il exprime rarement...

Lors de l'expérimentation 99-2000 on a fait passer un questionnaire avant enseignement et repéré les raisonnements sur le circuit simple. On peut les mettre en parallèle avec ceux mis en oeuvre sur le circuit série, après enseignement, lors du questionnaire final, en Mai 2000.

Tableau de l'évolution des raisonnements
des élèves de la séquence au cours de l'expérimentation 99 - 2000

Raisonnement Population	local	séquentiel	à courant constant	systémique
Avant enseignement / 90 élèves	28 %	54 %	3 %	15 %
Après la Séquence / 146 élèves	9 %	15 %	15 %	51 %
Bilan	- 19 %	- 39 %	+ 12 %	+ 36 %

On observe en fin d'année une diminution des raisonnements locaux et séquentiels et un progrès des raisonnements à courant constant et systémiques.

Nous avons aussi établi une comparaison entre les raisonnements cohérents rencontrés avant enseignement sur le questionnaire de J.L.Closset (Annexe III), à l'entrée en seconde, et les raisonnements cohérents trouvés lors du test final sur le montage en série, puis sur le montage mixte :

Raisonnement Date et circuit	local	séquentiel	à C.Constant	correct	Total cohérent
Initial Circuit simple	2	19 / 24 79 %	3	0	24 / 34 70 %
Final Circuit série	1 Ifil = 0	0	2	9 / 12 75 %	12 / 17 70 %
Final Circuit mixte	4	4 9 %	13 / 45 29 %	24 / 45 53 %	45 / 64 70 %

Avant l'enseignement de la classe de seconde, la majorité des élèves cohérents le sont avec le raisonnement séquentiel, ce qui est en accord avec les travaux de J.L.Closset (1983).

Après enseignement, il apparaît une **diminution du raisonnement séquentiel et l'élévation du raisonnement systémique.**

Le taux global de cohérence paraît stable sur cet exemple, mais ce ne sont pas les mêmes raisonnements. Il y a déstabilisation du raisonnement séquentiel, (susceptible de réapparaître, particulièrement à une question portant sur la place d'un fusible), qui se trouve remplacé par d'autres. Le raisonnement local est souvent peu cohérent et peu tenace à ce niveau d'étude.

En fin d'année, les raisonnements les plus représentés sont le raisonnement systémique et le raisonnement à courant constant : le raisonnement correct est majoritaire sur le circuit simple, cédant du terrain au raisonnement à courant constant sur le circuit mixte, ce qui affecte le taux de cohérence de ces deux raisonnements.

On observe donc un changement de la nature des raisonnements cohérents des élèves, allant dans le sens du respect de l'unicité du débit le long du circuit série, ce qui représente un réel progrès.

Une autre façon de mesurer l'état de la connaissance des élèves, peut être d'observer tout au long d'un questionnaire qualitatif quel est le raisonnement cohérent le plus représenté chez les élèves. C'est ce qui a été fait suite au questionnaire passé en mai 99, dont voici les résultats :

Tableau des raisonnements cohérents sur l'ensemble du questionnaire

Raisonnement Enseignement	local	séquentiel	à courant constant	correct	total
Séquence / 64 élèves	6 %	6 %	20 %	37 %	70 %

70 % des élèves de la séquence ont utilisé le même raisonnement pour répondre aux différentes questions qualitatives portant sur des circuits à deux ou trois récepteurs, en fin d'année. La moitié des élèves cohérents le sont avec le raisonnement correct.

Quelque soit le mode d'observation, on peut affirmer qu'avant enseignement en classe de seconde, le raisonnement cohérent majoritairement employé est le raisonnement séquentiel, et après l'enseignement de la séquence, le raisonnement le plus représenté est le raisonnement correct, puis celui à courant constant qui respectent tous deux la continuité du débit.

b – 3 – Loi des nœuds

Des entretiens nous ont permis de décrire les représentations des élèves qui violent la loi des nœuds à l'entrée en seconde. Lors de l'essai 1997-98 ce sont 30 / 68 élèves qui ne conçoivent pas la circulation à un nœud.. C'est dire si l'idée d'un partage à un nœud est loin d'être évidente et immédiate pour une proportion non négligeable d'élèves qui l'ont pourtant rencontrée au collège. Après un premier enseignement, lors du réinvestissement, elle restait violée par 17 / 68 élèves. Un mois plus tard il n'y a plus qu'une élève au raisonnement local-énergétique pour la violer.

Une fois la loi acquise, ils sont 39 / 68 à prévoir un **partage équitable** et 28 / 68 à l'imaginer en fonction des branches. Ce partage équitable peut se trouver justifié par un raisonnement local dans la branche, telle Chrystelle : « *A l'extérieur des bornes de la résistance l'intensité est la même* » ou Céline : « *l'intensité est la même dans les fils* » ou séquentiel, telle Virginie : « *D et E sont tous deux situés avant les résistances.* »

Lors de l'essai 1996-97, avant enseignement nous avons trouvé 7 / 34 viols, 7 élèves pour prévoir un partage différent et 20 un partage égal.

En fin d'année, à la question qualitative, la majorité des élèves connaissent la loi et répondent comme le physicien, par contre cet acquis n'est pas toujours réinvesti dans des prévisions sur des circuits mixtes ou dans les réponses numériques. Voici les prévisions à différentes questions recueillies lors d'un test final :

Représentations du débit à un nœud

test final de Mai 1999 (Annexe VI.9-14)

Loi partage	Respectée ≠	Respectée =	Violée	Sans réponse
Question				
III qualitative (1/2 classes)	33 / 49 67 %	13 / 49 26 %	0	3 / 49 6 %
V₂ numérique Circuit // (1/2 classes)	21 / 45 47 %	5 / 45 11 %	14 / 45 31 %	5 / 45 11 %
V₃ numérique Circuit mixte (classes entières)	12 / 35 réponses 34 %	6 / 35 17 %	17 / 35 49 %	59 / 94 63 %

De même, en Mai 2000 sur les 145 élèves de différentes académies ayant appris avec la séquence, on a trouvé, en réponse à la question qualitative sur le circuit dérivation, 69 % d'élèves qui respectent la loi des nœuds, 20 % qui la violent et 10 % de sans réponse.

En cours d'enseignement on s'aperçoit que les représentations mises en place par les élèves qui les conduisent au viol de cette loi ne représentent pas un réel obstacle. Après un premier enseignement il reste généralement un élève par classe pour la violer. Mais, lors de calculs, on constate par contre que :

- par manque d'outils disponibles ils peuvent utiliser la loi des nœuds avec l'hypothèse gratuite d'un partage égal, quand sur des questions qualitatives ils le prévoient différencié ;
- d'autres hypothèses plus fortes, comme le générateur à débit constant, combinées à de vraies lois physiques, telle la loi d'Ohm, les conduisent à fournir des résultats qui violent la loi des nœuds alors qu'ils l'ont utilisée pour des prévisions qualitatives.

En fin de 1^oS, en réponse à la question qualitative sur le circuit avec dérivation, la loi est respectée par 19 / 19 élèves ayant suivi la séquence, dont 17 / 19 qui prévoient un partage en fonction des dipôles situés dans les branches. Cette réponse ainsi que celle aux autres questions sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau récapitulatif des élèves ayant respecté la loi aux différentes questions
(à la question III, c'est le % calculé sur l'ensemble des élèves (19) ;
aux questions V, le % des réponses fournies, celles-ci étant peu nombreuses)
fin de 1^oS

Question	III	III	V ₂	V ₂	V ₃	V ₃
Partage	=	≠	=	≠	=	≠
	10 %	90 %	15 %	40 %	18 %	62 %
Loi respectée par :	100 % des élèves		55 % des réponses		80 % des réponses	

On observe que sur la question qualitative, il y a 100 % de réponses qui respectent la loi parmi les élèves ayant suivi la séquence, ce qui montre qu'elle est connue de tous.

Le passage au quantitatif leur offre divers outils et différentes approches, parmi lesquels on a constaté une préférence pour la loi d'Ohm. Ils l'utilisent en lien avec un générateur à débit constant, ce qui leur permet de fournir une réponse à toutes les questions sans utiliser la loi des nœuds, qui se trouve violée, le plus souvent sans qu'ils s'en rendent compte (parfois un élève le remarque).

Sur cet exemple, les réponses qualitatives sont plus nombreuses et meilleures que les réponses numériques, qui, pour être correctes, nécessiteraient de faire appel aux propriétés des deux concepts I et U.

b - 4 - La représentation du générateur

Etat initial : lors de l'essai 1996-97 nous avons trouvé 32 / 34 élèves pour lesquels le rôle de la pile est de fournir une intensité constante : seuls deux élèves imaginent qu'elle puisse varier.

Cette représentation est le plus souvent associée à une absence de connaissance concernant la différence de potentiel et son rôle, et aux raisonnements locaux (2 élèves) ou séquentiels (19 élèves) ou à courant constant (3 élèves), raisonnements employés par les 24 / 34 élèves cohérents sur l'ensemble du questionnaire préliminaire, le raisonnement correct n'apparaissant que ponctuellement.

Cette représentation peut conduire à des prévisions surprenantes, même après enseignement. Par exemple lors des suivis, 3 élèves sur une classe de 35 affirment : « le générateur délivre toujours la même intensité à un circuit, » y compris en circuit ouvert.

Evolution : on peut l'imaginer en lien avec la représentation de la continuité du débit le long d'une branche et avec l'évolution de la représentation du conducteur résistant déjà décrite. Son influence sur le débit tend tout à la fois à se préciser et à s'étendre à l'ensemble du circuit L'idée d'une évolution possible du débit du générateur trouve un terrain favorable dans les évolutions précédentes, mais se trouve entrer en conflit avec le développement du raisonnement à courant constant.

Quel est donc l'intérêt pour l'élève du raisonnement à courant constant ?

Ce raisonnement qui considère que l'intensité reste la même en tout point du circuit se trouve être, au test en fin de seconde en Mai 1999, aux questions numériques :

- le raisonnement cohérent sur l'ensemble du circuit mixte le plus répandu, celui de 9 / 35 réponses, soit 26 % (enseignement habituel 50 %) ;
- un raisonnement stable, déjà utilisé par 6 / 9 de ces élèves à la question précédente, soit 67 % (enseignement habituel 100 %)

Ce raisonnement qui respecte la continuité du débit constitue une avancée par rapport à l'état initial qui permet à l'élève de conserver sa représentation d'un générateur à débit constant. C'est pour l'élève un outil performant, par rapport au raisonnement systémique plus difficile, pour différentes raisons :

1 - **S'il ne se passe rien dans le circuit, il lui permet de fournir la réponse correcte.** Or l'élève adopte toujours la démarche du moindre effort : la solution la meilleure ne sera pas spontanément celle enseignée, mais celle qui apparaît la plus simple jusqu'à ce qu'elle soit mise en défaut, ce qui nécessite un travail avec des circuits évolutifs, ignorés de l'enseignement habituel, jusqu'à présent. C'est pourquoi nous avons indiqué entre parenthèse les pourcentages correspondant à l'enseignement habituel où il se trouve encore plus développé.

2 - **Il dispense de la mise en oeuvre, et donc de la connaissance, des lois physiques :** quelle aubaine ! En effet l'élève qui raisonne à courant constant peut répondre à toute question portant sur le débit du courant sans se soucier de la nature du circuit, des concepts de différence de potentiel, du calcul de la résistance équivalente, de la loi des nœuds ou de la loi d'Ohm : s'il la connaît en un point, il la connaît partout !

Cette simplicité d'utilisation comme outil de prédiction, aboutissant assez souvent à la réponse attendue peuvent expliquer sa popularité...

Lors des suivis nous avons noté le glissement progressif des raisonnements en cours de séquence, les raisonnements les plus primitifs étant peu à peu remplacés par les raisonnements respectant la continuité du débit, comme par un élargissement progressif du regard à l'ensemble du circuit. L'élève imagine peu à peu l'influence d'un élément sur sa branche, puis sur une portion de plus du circuit... ce sont des étapes dont ils ont besoin pour parvenir au raisonnement systémique. Ils sont plus nombreux à envisager l'interaction en réponse aux questions qualitatives. Par exemple lors du questionnaire en fin de seconde, en Mai 1999, voici les réponses recueillies aux différentes questions, observées sous l'angle de l'évolution du débit du générateur :

Tableau des réponses avec un générateur dont le débit évolue avec le circuit
(fin de seconde, Mai 1999)

Question Circuit Débit du générateur :	Question II qualitative simple	Question III qualitative série	Question III qualitative dérivation	Question IV qualitative mixte	Question V ₃ numérique mixte
Varie	91 / 123 élèves 74 %	27 / 59 élèves 45,8 %	27 / 64 élèves 42,2 %	47 / 123 élèves 38,2 % 47 / 110 répons. 42,7 %	13 / 123 élèves 10,6 % 13 / 50 réponses 26 %
Constant	30 / 123 24,4 %	28 / 59 47,5 %	35 / 64 55 %	63 / 123 51,2 % 63 / 110 57,3 %	37 / 123 30,1 % 37 / 50 74 %
Sans réponse	2 / 123 1,3 %	4 / 59 6,8 %	2 / 64 3 %	13 / 123 10,6 %	73 / 123 59,4 %

Lors des suivis, voici en fin d'année, la représentation du débit du générateur aux questions qualitatives :

Raisonnement systémique au niveau du générateur : on observe jusqu'à 47 % de raisonnement systémique à Brive, 32 % à Nantes et 4 % à Lille ! Soit une moyenne de 26 %.

A Brive 13 / 16 de ces réponses, soit plus de 80 % correspondent à une évolution correcte du débit. A Nantes ce sont 7 / 18, soit moins de 40 %, erreur expliquée le plus souvent par leur représentation uniquement « résistive » ou résistante du conducteur ohmique, mêlées dans toutes les populations à quelques réponses en termes d'énergie.

Raisonnement considérant le débit du générateur constant : ils sont : 15 / 34 soit 44 % à Brive, 34 / 56 soit 60 % à Nantes, 21 / 28 à Grenoble, 22 / 28 à Lille, soit respectivement 75 et 78 %.

Brive est la seule population qui compte plus de raisonnements avec un générateur dont le débit varie.

Nous avons relevé lors du questionnaire passé en fin de 1^oS, un an après enseignement de la séquence, les réponses concernant le débit du générateur aux différentes questions :

Tableau des élèves ayant adapté le débit du générateur au circuit
(réponses qualitatives)

Question Après séquence	II simple	III série	III dérivation	IV (R1 + R2) // R3	IV (R1 // R2) + R3
Fin 1 ^o S	84,6 %	75 %	58 %	35 %	79 %

Réponses où il existe une interaction entre le générateur et le circuit
(réponses quantitatives)

Question Après séquence	V ₂ série	V ₂ dérivation	V ₃ mixte
Fin 1 ^o S	32 %	40 %	33 %

Observations :

L'évolution attendue se rencontre au niveau des réponses qualitatives portant sur le circuit simple tant en classe de seconde qu'en fin de première.

Sur le circuit avec dérivation, parmi les élèves qui prévoient une évolution, 15 / 27 l'imaginent dans le sens prévu et 12 en sens contraire, ce qui correspond soit à une erreur sur la résistance équivalente, soit sur le rôle du conducteur résistant : l'ajout d'une résistance en dérivation augmenterait la résistance du circuit. Un seul aspect du conducteur résistant semble avoir été retenu par ces élèves, ce qui pourrait correspondre à une étape d'apprentissage du concept. La même chose se retrouve lors des suivis 2000 : pour 38 prévisions correctes, 27 évolutions en sens contraire du débit du générateur.

La constance du débit, propriété attribuée de longue date au générateur par l'élève, semblerait constituer un **réel obstacle** dans l'accession au raisonnement systémique du physicien. Elle l'empêche d'envisager une interaction entre les différents éléments constitutifs d'un circuit. A l'entrée en seconde, sur un circuit ouvert, à la question « la pile débite-t-elle un courant ? » près de 50 % des élèves répondent oui, avec l'éventuel commentaire oral : « n'est-ce pas son rôle ? »

Les élèves ayant suivi la séquence **fournissent de meilleures réponses aux questions qualitatives**. Pour les réponses chiffrées, les outils à employer ne leur sont pas assez familiers, telle la résistance équivalente, ce qui les conduit soit à émettre (plus ou moins explicitement) des hypothèses fausses, comme la constance du débit de la branche principale, soit à se réfugier dans un raisonnement à courant constant. Plus des trois quarts de ces élèves fournissent une réponse correcte sur le circuit simple ou en série, ils sont moins familiers du montage en dérivation ou mixte et, dans tous les cas **ils raisonnent mieux qu'ils ne calculent**.

Le réinvestissement des représentations qualitatives pour répondre à des questions numériques doit nécessiter des étapes. Faute de les connaître, le passage au formalisme n'est pas gagné : l'élève retrouve ses représentations antérieures...

b – 5 – La représentation du fil

Le fil est un composant considéré comme simple, si simple qu'il n'est jamais enseigné pour lui-même. Lors du passage des questionnaires après enseignement nous avons trouvé des affirmations inattendues, par exemple en réponse à la question I (Annexe VI.5 ou VI.10), 11 / 123, soit 9 % des élèves prévoient une **intensité nulle dans les fils**, tel Mathieu : « *L'intensité aux bornes d'un fil conducteur est toujours nulle* ».

Ainsi exprimé, on peut penser à une confusion au niveau des concepts dont la représentation serait en cours d'élaboration. Mais d'autres formulations se trouvent, dont l'origine est moins évidente, telle celle de Sébastien : « *Dans un fil sans composant, l'intensité est de 0A.* ».

On est malgré tout conduit à penser que cette propriété attribuée aux fils est une **conséquence de l'enseignement** qui se retrouve dans les différentes classes aux réponses à diverses questions, par exemple :

- sur le circuit série, Florence affirme: « *Dans un fil il n'y a pas de courant* » ;
- sur le circuit mixte, Mathieu : « *Dans un fil conducteur l'intensité est nulle* » et
- à l'état de traces dans les réponses numériques, par exemple par 2 / 59 élèves à la question V_2 portant sur les dipôles en dérivation.

Au questionnaire passé en fin de 1^oS cette réponse ne s'est retrouvée que dans les réponses numériques d'élèves n'ayant pas suivi la séquence en seconde. Cette remarque nous invite à penser que l'enseignement de la séquence ne serait pas le seul qui conduise une minorité d'élèves à cette prévision.

Nous avons retrouvé des fils traversés par des intensités nulles lors de l'expérimentation dans d'autres académies, que les élèves aient suivi ou non l'enseignement de la séquence. Au questionnaire passé après enseignement, en Mai 2000, six élèves du chercheur et six autres qui ont appris avec la séquence prévoient une intensité toujours nulle dans un fil avec différentes formulations, tel Tobias qui affirme « *L'intensité est toujours nulle dans un fil* » et Jamel : « *L'intensité aux bornes d'un fil est nulle, donc elle reste toujours nulle.* »

Conclusion

Nous venons d'observer une évolution de la nature du raisonnement utilisé. Il était séquentiel, il est devenu majoritairement à courant constant en réponse à des questions numériques, plus souvent systémique en réponse à des questions qualitatives.

Nous assistons à une représentation de la continuité du débit le long d'une branche, de part et d'autre d'un dipôle, de part et d'autre d'un nœud.

Le concept d'interaction assez facile à mettre en place sur le circuit simple ou série, démarre sur le circuit avec dérivation avec la possibilité d'un partage différencié à un nœud et un générateur au débit variable.

Ces représentations apparaissent plus faciles à mettre en place de façon qualitative, plus difficiles à maîtriser sur des exemples numériques où le recours au raisonnement à courant constant, ou au moins au générateur à débit constant fournit l'opportunité d'une réponse plus simple, aussi **raisonnent-ils mieux qu'ils ne calculent.**

Il reste à concevoir des étapes facilitant l'accès des élèves aux réponses numériques.

3 - c – Concept de d.d.p.

Nous avons observé, avant enseignement l'ignorance de ce concept par la majorité des élèves, et lorsque l'élève en connaissait une propriété c'était le plus souvent dans un cas particulier aux propriétés singulières :

- des dipôles identiques en série où le partage de la d.d.p. est égal ;
- des dipôles reliés aux bornes du générateur : alors non seulement ils possèdent la même différence de potentiel, mais elle est égale à celle du générateur.

Ces lois, que l'élève a tendance à généraliser hâtivement à d'autres montages lors de nos questionnaires préliminaires, ont été appelées « lois collège ».

Nous avons cherché à donner du sens au concept de d.d.p. en fournissant des occasions à l'élève de le distinguer de l'intensité. Le générateur, le fil ou l'interrupteur ouvert en sont des exemples.

Nous allons donc observer les prévisions après enseignement, parfois en cours de séquence, le plus souvent en fin de seconde ou même de 1^oS, concernant la différence de potentiel aux bornes de dipôles particuliers, comme le fil, ou le générateur, puis les propriétés aux bornes de dipôles reliés par des montages différents.

c – 1 – Observation de la représentation de la d.d.p. aux bornes du générateur

Pour se faire une idée de l'existence, pour l'élève de seconde, du concept qui caractérise le générateur, nous allons observer quelle est la d.d.p. à ses bornes, que le circuit soit ouvert ou fermé. Peut-il, pour l'élève, exister une d.d.p. (une cause à la circulation) sans qu'il circule un courant (sans l'effet) entre ces deux points ?

En 1998, en cours d'apprentissage, 24 / 68 élèves prévoient une d.d.p. nulle aux bornes du générateur en circuit ouvert, alors qu'ils ne sont plus que deux en circuit fermé, ce qui semble signifier pour les 22 autres :

pas de circulation = pas de d.d.p.

Alors, l'interrupteur ouvert (ou une ampoule grillée...) fournit une occasion de réinvestissement. Il reste encore 8 / 68 élèves pour prévoir 0 V à ses bornes dont les justifications montrent qu'ils raisonnent à partir d'une seule notion, par exemple Caroline : « *Aucun mouvement possible, aucune tension* », ou Vincent : « *Le circuit est ouvert, donc pas de courant.* »

Nous disposons des représentations qualitatives en fin d'année dans les différentes académies où des élèves ont appris avec la séquence (Brive étant le seul lieu avec des élèves ayant un projet scientifique, les autres classes sont indifférenciées). Ces réponses étant assorties de justifications, nous avons recherché l'origine des prévisions fausses dans la population de Grenoble. Le plus souvent la variation des deux grandeurs U et I se fait dans le même sens, ainsi pour Florian : « *U_{PN} augmente, car la résistance CD étant enlevée, le courant circule plus librement* » et plus loin « *U_{PN} diminue, elle est nulle, dans un circuit ouvert, aucun courant ne passe.* »

Il semblerait ici que l'élève raisonne à partir d'une seule notion en terme de courant. En observant d'autres justifications, on note dans les explications la fréquence du terme « **courant** » associé à une idée de **circulation**.

Tableau des réponses qualitatives portant sur la d.d.p. aux bornes du générateur

Réponse Elèves de la séquence à :	Correcte UPN = Cte	Ct. Circuit fermé et Varie Circuit ouvert	Tantôt constant, tantôt variable	Varie toujours : Loi I	Incomplète	Sans réponse
Brive 34 él.	26 76 %	2	4	2	0	0
Grenoble 28 él.	14 50 %	3	5	2	0	4
Lille 28 él.	11 40 %	6	2	2	4	3
Nantes 56 él.	40 71 %	6	6	2	2	0
Bilan séquence 146 él.	91 62 %	17 12 %	17 12 %	8 5 %	6 4 %	7 5 %

Certains élèves semblent avoir conservé une notion unique qui aurait certaines propriétés de la circulation : absence en circuit ouvert, « *emprunte le chemin le moins résistant* » (Martial), ou encore pour Tobias un débit constant : « *U_{PN} reste constante : un générateur délivre toujours un même courant.* »

Ces résultats ressemblent à ceux recueillis sur le circuit simple dont la valeur de la résistance a changé (Question II, mai 1999, Annexe VI.6 ou VI.11 ; 4 classes : 2 scientifiques + 2 indifférenciées) : 67 / 123 réponses correctes (54 %) ; 46 / 123 fausses (37 %) et 10 / 123 (8 %) de sans réponse.

Nous devons faire remarquer que les questions qualitatives ne demandent que de comparer la d.d.p. aux bornes du récepteur à celle aux bornes du générateur sur le circuit simple. Or nous avons observé que l'élève qui répond :

- **$U_g = U$ récepteur** fournit une réponse compatible avec le raisonnement correct, mais aussi avec $U =$ constante, réponse souvent associée à une réponse en terme de courant constant, qui ne peut être prise en compte en tant que telle que s'il fournit une justification... ou

- **U dipôle = constante** qui ne s'en distingue que par la tension nulle aux bornes du fil, et qui permet de fournir sur le circuit simple (et celui avec de simples dérivations) des prévisions compatibles avec la physique.

Il paraît donc important de prendre en compte en même temps les réponses concernant le débit du générateur pour mieux repérer les élèves qui distinguent les deux concepts, ce que nous avons fait avec les réponses aux questions numériques.

Nous allons maintenant observer les réponses recueillies aux questions numériques en fin d'année (Mai 1999), puis en fin de 1^o S :

**Tableau des réponses numériques portant sur
la d.d.p. aux bornes du générateur**

Classe Question	2° scientifique V	1° S V ₂	1° S V ₃
Réponse :			
Correcte : Ug = Cte Ig varie	20 / 62 32,2 %	11 / 39 28 %	8 / 39 21 %
Ug = Cte Ig = Cte	19 / 62 30,6 %	13 / 39 33 %	9 / 39 27 %
Ug varie Ig = Cte	16 / 62 25,8 %	8 / 39 21 %	5 / 39 13 %
Ug varie Ig varie		4 / 39 10 %	

Certains élèves ont appris à distinguer les deux concepts, mais permutent les propriétés : la d.d.p. varierait alors que le débit resterait constant. On peut relire ce tableau en regroupant les réponses avec le souci des acquis :

Classe Question	2° Scientifique V 62 élèves	1° S V ₂ 39 élèves	1° S V ₃ 39 élèves
Réponse :			
Ug constante	39 / 62 63 %	25 / 39 64 %	23 / 39 59 %
I et U propriétés différentes	36 / 62 58 %	19 / 39 49 %	13 / 39 33 %
Dont, conformes à la physique :	20 / 36 55 %	11 / 19 58 %	8 / 13 62 %

Ce tableau fait apparaître un début d'apprentissage du concept chez les élèves qui le considèrent constant aux bornes du générateur, comme chez les élèves qui attribuent des propriétés différentes aux grandeurs intensité et différence de potentiel. Parmi ceux-ci la moitié des élèves scientifiques ont délaissé le générateur à débit constant au profit d'un générateur à d.d.p. constante.

Nous ne pouvons pas manquer de remarquer que malgré le nombre de montages réalisés par les élèves, le plus souvent alimentés par une alimentation stabilisée 6-12 V, dans les 4 classes de la séquence il ne s'est trouvé que 26 élèves (20 des classes scientifiques et 6 des autres) qui savent que cette d.d.p. reste constante alors que le débit varie : c'est un progrès au regard de l'état initial, mais il en reste à faire... pourquoi ? Il convient sans doute de repenser cet apprentissage et de faire un retour sur les hypothèses.

Recherchons tout d'abord ce que cet apprentissage demandait à l'élève. A l'entrée en seconde de septembre 1998, 56 % des élèves qui allaient suivre la séquence considéraient le débit du générateur constant. Après enseignement 63 % des élèves scientifiques (33 % des autres) considèrent la d.d.p. aux bornes du générateur constante, ce qui est une transposition venue de l'enseignement. Par ailleurs des élèves attribuent des propriétés différentes aux deux concepts, étape claire de l'enseignement de la séquence (58 % des élèves scientifiques, 43 % des autres). Parmi ces élèves plus de la moitié ont abandonné le débit constant du générateur au profit d'une d.d.p. constante à ses bornes.

Ce sont là différentes étapes de l'apprentissage, dont certaines demandent de prendre en compte un concept nouveau, de lui attribuer des propriétés, quand d'autres exigent d'abandonner ses représentations comme celle d'une seule notion de courant, ou d'un générateur à débit constant. Pour délaier ses convictions, des études ont montré que cela demande du temps, des étapes pour que l'esprit réalise l'utilité de la connaissance nouvelle. A ce sujet nous aimerions faire deux remarques :

- l'enseignement de l'électricité démarrant en classe de 4°, comment se fait-il que l'élève arrive en seconde avec les représentations que nous avons trouvées ? Dans ce contexte,
- comment se fait-il que l'enseignement considère ce savoir comme élémentaire et connu ?

Finalement, même si la séquence n'a pas permis le progrès attendu et recherché pour tous les élèves, elle paraît plus efficace que l'enseignement reçu jusque là.

Toutefois, cet état des lieux sur une propriété de base du concept, dans le cadre de nos hypothèses révèle une vérification insuffisante de la maîtrise des prérequis en cours d'apprentissage. L'avancement de la séquence serait à revoir avec des réinvestissements plus nombreux, ménageant plus de passerelles, des gaps moins élevés entre leurs représentations et la connaissance nouvelle. Les étapes à envisager restent à concevoir autour de la représentation du générateur que nous voulons leur voir adopter, qui maintient une différence de potentiel constante entre ses bornes. Elle doit devenir plus performante que la représentation d'un générateur à débit constant (laquelle constitue un réel obstacle dans l'apprentissage de l'électrocinétique, comme nous avons eu l'occasion de le montrer), et sans doute naître de sa déstabilisation, l'élève cherchant alors une autre constante.

c - 2 - Observation de la d.d.p. aux bornes du fil

Le fil est un modèle difficile pour l'élève. A ses bornes existe une différence de potentiel nécessaire au déplacement des charges. Expérimentalement cette d.d.p. est très petite car le fil est un très bon conducteur, ce qui fait qu'on n'en tient pas compte. Quelle représentation l'élève en a-t-il ?

Lors de l'expérimentation dans différentes académies, voici les réponses recueillies aux questions qualitatives du questionnaire final (Mai 2000) :

Tableau des réponses qualitatives portant sur la d.d.p. aux bornes du fil

Elèves de la séquence à :	Réponse	Correcte $U_m = 0 \text{ V}$	$U_m = \text{Cte}$	Loi I U varie	?	Sans réponse
Brive	34 él.	31 91 %	0	3	0	0
Grenoble	28 él.	17 61 %	0	4	3	4
Lille	28 él.	10 36 %	1	5	7	5
Nantes	56 él.	48 86 %	1	5	1	0
Bilan séquence		106	2	17	11	9
	146 él.	73 %		12 %	7 %	6 %

On s'attendait à ce que l'élève, après les mesures faites en T.P., prévoit la d.d.p. aux bornes d'un fil nulle, presque nulle ou quasiment nulle. Ce n'est pas toujours le cas : Pourquoi ? Voici quelques justifications : Florian : « La d.d.p. entre C et D augmente car il y a une résistance en moins dans la boucle, de plus CD n'est qu'un fil. » A l'ouverture du circuit, la d.d.p. aux bornes du fil PA pour Tobias diminue « car le circuit est ouvert, il n'y circule pas de courant. » et pour Stéphane reste constante : « elle n'a pas traversé la résistance. »

Nous recueillons la **justification de l'évolution du débit**, la propriété fournie pouvant même avoir un **caractère séquentiel**. Nous retrouvons des élèves qui justifiaient l'existence d'une d.d.p. variable aux bornes du générateur en terme de courant qui circule.

Au niveau des réponses qualitatives le fil semble mieux connu que le générateur. Nous allons maintenant observer les réponses numériques, aux questions portant sur les circuits à 2 ou 3 récepteurs, en fin de seconde (Mai 1999) puis en fin de 1^{re}S (Mai 2000).

En fin de seconde 5 élèves (3 de classes scientifiques et 2 autres) affirment que l'intensité qui traverse un fil est nulle, dont 4 / 5 attribuent la même propriété aux deux concepts : la d.d.p. aux bornes du fil est également nulle. On peut penser qu'on assiste là à une confusion des connaissances, correspondant à une phase d'apprentissage (statut de l'erreur) qui va jusqu'à remettre en cause l'idée même de circulation... état instable qui ne se retrouve pas en classe de première.

**Tableau des réponses numériques portant sur
la d.d.p. aux bornes du fil**

Réponse	Classe Question	Seconde V ₂	Première V ₃
Correcte : $U_{fil} = 0$ $I_{fil} \neq 0$		42 / 62 élèves 68 % 42 / 51 réponses 82 %	24 / 39 élèves 61 % 24 / 32 75 %
$U_{fil} = 0$ (seul en 1 ^o S) et $I_{fil} = 0$ (en seconde)		3 / 62 5 %	2 / 39 5 %
$U_{fil} \neq 0$ (seul en 1 ^o S) et $I_{fil} \neq 0$ (en seconde)		6 / 62 10 %	2 / 39 5 %
Autres		0	4 / 39 10 %
Sans réponse		10 16 %	7 / 39 18 %

Pour ceux qui **distinguent les deux concepts U et I** au niveau du fil, les propriétés sont celles de la physique. Elles sont connues de la majorité des élèves et se trouvent dans **82 % des réponses**. Rappelons nous que c'était le pourcentage d'élèves qui au départ prévoyaient 6 V partout en circuit fermé, ou 0V partout en circuit ouvert... Le progrès au niveau des prévisions est évident, mais il apparaît, à la lecture de ces réponses, que ce dipôle trop simple, trop usuel pour que l'enseignement habituel y consacre du temps, mériterait d'être vraiment étudié.

Il reste une minorité d'élèves pour fournir la même prévision pour I et U aux bornes du fil : soit tous deux nuls, soient tous deux non nuls. Cette réponse fait penser à une représentation monoconceptuelle en terme de courant. En toute rigueur ils n'ont pas tout à fait tort, mais leur connaissance reste à préciser.

Le fil et le générateur appartiennent à tout circuit électrique. Dans la mesure où l'on cherchait à ce que l'élève construise deux concepts distincts, avec des propriétés toutes différentes nous allons observer les élèves ayant attribué ses propriétés à chacun de ces deux éléments fondamentaux. L'ensemble de ces propriétés apparaissant constituer une base minimale de différenciation des concepts. Observons les élèves qui la possèdent en fin de seconde (Mai 1999) :

Etude comparée de l'intensité et de la d.d.p. aux bornes du générateur et du fil
62 élèves

Composant	Générateur				Fil		
	Non différenciation		Correcte		Correcte	Non différenciation	
Réponse	sans	Ig = Cte Ug = Cte	Ig = Cte Ug varie	Ig varie Ug = Cte	Ufil = 0 I fil ≠ 0	Ufil = 0 Ifil = 0	U fil ≠ 0 I fil ≠ 0
Elèves	7	19	16	21 34 %	42 68 %	4	6

On constate que le fil est connu par deux fois plus d'élèves que le générateur. Quelle représentation du générateur ont les élèves à la réponse correcte à propos du fil ? 18 / 42 ont aussi une réponse correcte ; 24 / 42 se représentent le générateur à débit constant, dont 11 avec une d.d.p. variable (prévisions contraires de celle du physicien) et 13 une d.d.p. constante.

La principale cause des représentations fausses concernant le générateur se retrouve : son débit qui resterait constant pour 56 % des élèves. Aussi n'y a-t-il que 20 élèves (18 scientifiques et 2 autres) ayant appris avec la séquence, en possession de cette base minimale, soit 30 %, sur laquelle peuvent ensuite venir se greffer les propriétés concernant les dipôles montés en série ou en dérivation.

Après cette étude des réponses concernant le fil, nous retrouvons les conclusions formulées à propos du générateur : des élèves ont progressé mais l'apprentissage serait à poursuivre. Nous devons retrouver des

observations voisines au niveau des réponses qualitatives, sur le circuit simple, c'est à dire aux questions I et II, en fin de seconde (Mai 1999, Annexe VI) :

Réponses qualitatives concernant la d.d.p. aux bornes des éléments reliés dans un circuit simple

Réponse	Question	I	II
Correcte		44 / 62 71 %	33 / 62 53 %
Fausse		Correcte ? 4 Justification fausse 4 Loi Intensité 3 Sans explication 5 Hors sujet 2	26
Sans		0	3

A la question I nous n'avons compté comme correctes que les réponses aux justifications exactes qui conduisent à prévoir la d.d.p. du générateur égale ou supérieure à celle aux bornes de la résistance selon que la d.d.p. aux bornes des fils est ou non négligée.

Certaines prévisions correctes étaient assorties de justifications qui l'étaient moins, comme certaines affirmations trop générales, comptabilisées en « juste ? » telle Caroline : « Dans un circuit la d.d.p. est constante aux bornes des deux dipôles » ou « La d.d.p. est la même aux bornes de chaque dipôle. »

Des affirmations fausses concernant la d.d.p., peuvent conduire à une réponse correcte lorsqu'il n'y a qu'un seul récepteur, telles : Laure : « Dans un circuit série, la tension du générateur est la même qu'aux bornes des différents récepteurs », ou Julie : « Dans un circuit série la tension est la même en tout point du circuit. ».

Enfin des élèves ont fourni des réponses en termes d'intensité.

Parmi les élèves à la réponse correcte à la question I se trouvent les 33 élèves à la réponse correcte à la question II, dont 30 donnent une réponse correcte à propos de l'intensité sur les deux questions, soit 48 % des élèves au raisonnement correct sur le circuit simple.

En première S, 37 / 39 élèves fournissent la réponse correcte à la première question (95 %), mais ils ne sont plus que 28 / 39 (72 %) à la question II. Ainsi une résistance peut avoir pour certains élèves un effet méconnu sur le débit d'électrons, mais plus encore quant à la d.d.p. à ses bornes. Un travail qualitatif et des réinvestissements sur des circuits évolutifs semblent pouvoir donner du sens aux concepts : ce travail reste à poursuivre.

Les élèves ayant une représentation correcte du générateur l'ont très généralement pour le fil (18 / 21) et à partir de là sur le circuit simple. La connaissance du générateur représente plus un obstacle à l'analyse correcte du circuit que le fil. Son étude apporte toutefois une cohérence à l'ensemble.

c – 3 – Propriétés de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série ou en dérivation

Nous allons observer les élèves ayant fourni la réponse correcte aux questions portant sur la d.d.p. aux bornes des dipôles présents dans un circuit à deux récepteurs. Le circuit série peut être (Annexe VI) :

- un circuit simple : question I qualitative et V_1 numérique ;
- un circuit simple où la valeur de la résistance a été modifiée : question II qualitative ;
- un circuit série ou parallèle : question III qualitative ou V_2 numérique.

Nous disposons des réponses à ces questions fournies après enseignement de la séquence :

- dans les classes ayant participé à l'expérimentation 2000 : une classe scientifique de Brive et des classes indifférenciées d'autres académies ;
- dans deux classes scientifiques de Brive (Mai 99), et
- ce qu'il en reste un an plus tard chez les élèves suivant une 1^{re}S (Mai 2000).

c3.1 – Réponses correctes recueillies

Nous allons commencer par les réponses qualitatives. Nous avons rassemblé dans un tableau les élèves ayant fourni la réponse correcte ainsi que la réponse « collègue » avec partage égal de la d.d.p. entre dipôles montés en série :

**Tableau des élèves ayant fourni la réponse correcte
aux questions qualitatives portant sur la d.d.p.**

Question Partage Elèves	I	II	III série		III dérivation
			≠	=	
2° scientifiques Brive (Mai 99)	53 / 62 85 %	33 / 62 53 %	17 / 30 57 %	6 / 30 20 %	17 / 32 53 %
Autres 2° Brive (Mai 99)	35 / 61 57 %	30 / 61 49 %	6 / 29 21 %	11 / 29 38 %	9 / 32 28 %
Bilan 2° Brive (Mai 99)	72 %	51 %	68 %		41 %
1°S Brive (Mai 00)	37 / 39 95 %	28 / 39 72 %	11 / 20 55 %	7 / 20 35 %	13 / 19 68 %
2° de 4 académies (suivis 2000)			77 / 146 53 %		80 / 146 55 %

Remarque : à la question I, si en moyenne il y a 72 % de réponses correctes, tous les élèves ayant fourni une réponse, il reste 28 % des élèves pour répondre U = constante le long du circuit simple, ce qui est une propriété du concept d'intensité. Ils ont conservé une seule grandeur pour expliquer le fonctionnement du circuit.

**Tableau des élèves ayant fourni la réponse correcte
aux questions numériques portant sur la d.d.p.**

Question	V ₁	V ₂ série			V ₂ dérivation
Réponse	correcte	correcte	partage égal	loi correcte, avec Ig constant	correcte
Elèves					
2° Scientifiques Brive (Mai 99)	44 / 62 71 %	6 / 32	3 / 32	11 / 32	20 / 30 67 %
Autres 2° Brive (Mai 99)	31 / 61 51 %	0 / 32	6 / 32	11 / 32	5 / 29 17 %
Bilan 2° Brive (Mai 99)	61 %	19 %	14 %	34 %	41 %
1°S Brive (Mai 00)	30 / 39 77 %	4 / 19 21 %	2 / 19 11 %	9 / 19 47 %	15 / 20 75 %
2° de 4 académies (suivis 2000)	103 / 141 73 %	93 / 141 66 %	19 / 141 13 %		76 / 141 54 %

c3.2 - Analyse des réponses qualitatives

α - réponses qualitatives sur le circuit simple

Aux questions I et II, quelle que soit l'année ou le lieu, il y a au moins la moitié des élèves pour fournir la réponse correcte, ce qui représente un réel progrès en partant d'un niveau de connaissance zéro. Mais, malgré la simplicité de la question, il reste au moins 20 % des élèves pour ne pas fournir la réponse correcte.

On observe un pourcentage croissant de réponses correctes, des élèves de seconde non scientifiques en passant par les élèves de seconde scientifiques, aux élèves de 1°S : ce sont les effets conjugués de la motivation et de la sélection dont nous avons déjà parlé.

Il apparaît une diminution de l'ordre de 20 % des réponses correctes entre la question I et la question II où la valeur de la résistance a été modifiée. La lecture des justifications montre des réponses qui reposent sur la loi d'Ohm associée à la représentation implicite d'un générateur à débit constant. L'élève prévoit alors que **R et U varient dans le même sens**. Cette réponse révèle, sinon l'ignorance, tout du moins la non mise en application d'une propriété fondamentale de la d.d.p. en lien avec un obstacle déjà dénoncé : le **générateur à débit constant**.

β - réponses qualitatives sur les circuits à deux récepteurs

Les deux premiers points de l'analyse précédente se retrouvent, à savoir :

- la réponse correcte présente dans plus de la moitié des réponses, à l'exception des élèves non scientifiques analysant un circuit avec dérivations ;
- l'évolution de la connaissance, partant des élèves non scientifiques de seconde pour culminer chez les élèves de première scientifique.

Il apparaît une nouvelle source de prévisions erronées : des élèves continuent de penser, dans le cas de dipôles en série, que lorsqu'il y a **partage**, il est **équitable**, comme sur les exemples simples, avec des dipôles identiques, rencontrés au collège.

γ - réinvestissement de ces lois sur le circuit mixte

Voici, réunies dans un tableau, les observations faites à Brive, en fin de 1^{er}S :

**Tableau des réponses qualitatives
portant sur la d.d.p. aux bornes des récepteurs d'un circuit mixte
fin de 1^{er}S**

Sujet	Loi	correcte	« collège »	autre
$(R_1 + R_2) // R_3$		11 / 20 55 %	7 / 20 35 %	
$R_1 + (R_1 // R_2)$		1 / 19 5 %	6 / 19 32 %	4 / 19 21 %

Observations

Sujet $(R_1 + R_2) // R_3$

Une majorité d'élèves a réinvesti les lois de la d.d.p. sur ce montage mixte, où la loi collège en dérivation peut être utilisée. Mais il apparaît des réponses nouvelles, reflet d'une utilisation abusive des propriétés de la d.d.p. pour dipôles situés dans des branches dérivées : ces élèves pensent que des dipôles situés dans des branches dérivées possèdent la même d.d.p., propriété rencontrée au collège qui conduit des élèves à prévoir $U_{MN} = U_{ST}$, à moins que ce ne soit une autre « loi » (« même R, même d.d.p. ») qui s'est trouvée explicitée sur l'autre sujet ?

Des lois, à l'énoncé correct, conduisent en dehors de toute attente, aux mêmes prévisions « collège », ce qui représente peut-être une étape d'apprentissage.

Il y a aussi deux demi-réponses $U_{ST} = U_{AF}$ correcte et $U_{MN} = U_{ST}$ loi « collège », à moins que ce ne soit « même R, même d.d.p. » ?

Sujet $R_1 + (R_1 // R_2)$

Un seul élève fournit la réponse correcte assortie d'une justification correcte. Les autres prévisions correctes s'appuient sur des justifications fausses telles :

- « même R même d.d.p. » ce qui les conduit à prévoir $U_{MN} = U_{PQ}$, ce qui en l'absence d'explication, aurait pu apparaître comme la « loi collège » pour des dipôles montés en série ;

- ou une loi, qui ayant perdu son caractère algébrique, devient fausse : $U_{MN} < U_{PQ}$ et $U_{ST} < U_{AF}$

« $U_{AF} + U_{MN} = U_{PQ}$ car dans un circuit en parallèle chaque somme des tensions à une branche est égale $U_{ST} = U_{AF} + U_{MN}$. »

Synthèse

Les montages mixtes révèlent les propriétés attribuées par les élèves à la différence de potentiel aux bornes de dipôles montés en série ou en dérivation. En dehors des élèves à la réponse correcte (12 / 39) il est apparu des **élèves généralisant les lois** valables sur les circuits :

- avec deux dipôles identiques en série $U_R = U_{PN} / n$ soit $U_R = \text{constante}$ soit au circuit avec deux dipôles différents en série, soit à tous les dipôles d'un circuit mixte, quel que soit leur branchement ;

- avec des dipôles en dérivation reliés au générateur : $U_{\text{branche}} = U_{PN}$, ce qui peut aussi aboutir à $U_{\text{dipôle}} = \text{constante}$, ou encore $U = \text{Cte}$;

- et une idée nouvelle apparaît : « **même R, même d.d.p.** »

c3.3 - Analyse des réponses numériques

Nous allons observer ces réponses numériques et les comparer aux réponses qualitatives :

α - réponses numériques sur le circuit simple (question V_1 ; Annexe VI.9-VI.14)

Il pourrait sembler que cette question portant sur le circuit le plus élémentaire, le plus usité ne pose pas de difficulté. Mais, pour fournir une réponse numérique compatible avec celle de la physique, il fallait mettre en oeuvre un certain nombre de connaissances :

- la loi d'Ohm pour trouver la valeur de la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique connaissant sa résistance et l'intensité qui le traverse ;
- les lois de la d.d.p. le long d'un circuit série ;
- la valeur négligeable de la d.d.p. aux bornes d'un fil.

Or, si on observe les réponses en fin de seconde, parmi les élèves qui utilisent les propriétés de la d.d.p. sur le circuit simple ils sont 61 % à fournir la réponse correcte avec les bonnes unités, tandis que d'autres mettent bien en oeuvre les lois mais avec des erreurs d'unités (10,5%).

Sur cet exemple, on s'aperçoit que ce sont **les représentations qui pilotent les calculs** : le nombre d'élèves qui utilisent les propriétés de la d.d.p. sur le circuit simple est rigoureusement le même que la question soit qualitative ou numérique... (75 + 13 = 88)

β - réponses numériques sur les circuits à deux récepteurs (questions V_2 ; Annexe VI)

Nous devons distinguer les deux montages. En effet, le montage en dérivation ne nécessite aucun calcul supplémentaire : l'élève en possession de la propriété de la d.d.p. fournit la réponse numérique comme la réponse qualitative, pourvu que sa réponse à la question I soit correcte. Il n'est pas surprenant de trouver un pourcentage d'élèves voisin qui fournissent la réponse correcte à la question portant sur ce montage, qu'elle soit qualitative ou numérique. La parenté se retrouve à chaque passage du questionnaire quel que soit le lieu ou la classe.

Par contre, le montage en série nécessitait pour fournir la réponse correcte, le calcul de la résistance équivalente, avant la mise en oeuvre de la loi d'Ohm pour trouver l'intensité parcourant la boucle, puis de la propriété de la d.d.p. pour des dipôles en série. Aussi n'est-il pas surprenant que l'élève ait fait appel à ses représentations. Il s'appuie soit :

- sur un générateur dont le débit resterait constant, puis disposant de l'intensité applique une loi de la d.d.p. (la loi, ou la loi « collège ») ;
- sur le partage égal de la d.d.p. entre dipôles montés en série, « loi collège » qui, ici, permet une réponse encore plus rapide !

Sur ce montage il n'est donc pas surprenant d'observer une baisse du nombre de réponses correctes à la partie numérique accompagnée d'une dispersion des méthodes de résolution. Au total ce sont 58 % des élèves de seconde en Mai 99 et 79 % des élèves de première qui ont mis en oeuvre des propriétés de la d.d.p. pour répondre aux questions numériques sur le circuit série. Ces pourcentages sont légèrement inférieurs à ceux portant sur les réponses qualitatives, ce qui peut être le révélateur d'une difficulté à répondre pour l'élève...

On observe également, en réponse aux questions qualitatives comme aux questions numériques, des réponses au premier abord surprenantes. Quelque soit le circuit des élèves ont utilisé soit :

- $U = \text{Cte}$. Si cette relation ne s'applique qu'aux dipôles et se trouve associée à $U_{\text{fil}} = 0$ elle leur permet une prévision correcte sur le circuit simple et sur le circuit avec dérivation reliées aux bornes du générateur, (mais si c'est aussi utilisé aux bornes du fil, c'est la loi de l'intensité sur le circuit simple qui ne conduit qu'à des prévisions fausses à toutes les questions) ;
- $U = U_{PN} / n$. Si cette relation est associée à $U_{\text{fil}} = 0$ elle permet à l'élève de fournir une réponse correcte au circuit simple et au circuit formé de dipôles identiques en série.

Il faut ajouter que les exercices habituels ne posant pas de question sur les fils (ni sur les circuits ouverts ...) cette connaissance leur permet de fournir une réponse immédiate et correcte à un exercice sur le circuit simple et selon le cas sur le circuit en série ou celui avec dérivation.

Ces deux réponses semblent provenir de la généralisation d'une propriété valable dans un domaine précis, à l'ensemble des montages :

- la première est la propriété des dipôles montés en dérivation
- la seconde des dipôles, identiques, montés en série.

γ - réinvestissement de ces lois sur les circuits mixtes

Tableau des élèves ayant réinvesti, aux questions numériques sur le circuit mixte, une des lois de la d.d.p.
Réponses numériques

Dipôles en Loi	série		dérivation	
	correcte + collège	autre $I_g = Cte$	correcte	autre
Elèves				
2° scientifiques	25 / 62	12 / 62	24 / 62	8 / 62
Brive (Mai 99)	40 %	19 %	39 %	13 %
Autres 2°	11 / 61	7 / 61	11 / 61	9 / 61
Brive (Mai 99)	18 %	11 %	18 %	15 %
1°S	12 / 39	5 / 39	17 / 39	2 / 39
Brive (Mai 00)	31 %	13 %	44 %	5 %

Ce tableau montre un réinvestissement des propriétés de la d.d.p. dans des proportions voisines, que les dipôles se trouvent en série ou en dérivation. Certains élèves ont mis en oeuvre une seule des deux lois, d'autres ont réinvesti les deux :

Tableau des élèves ayant réinvesti les deux lois sur le circuit mixte
Réponses numériques

Loi	correcte	« collège »	autre	
			$U = Cte$	$I_g = Cte$
Elèves				
2° scientifiques	9 / 62	4 / 62	9 / 62	
Brive (Mai 99)	15 %	6 %	15 %	
Autres 2°	0 / 61	6 / 61	4	4
Brive (Mai 99)		10 %	7 %	7 %
1°S	5 / 39	2 / 39	5 / 39	
Brive (Mai 00)	13 %	5 %	13 %	

Sujet $R_1 + (R_1 // R_2)$

Les élèves qui ont fourni une réponse à cette question et qui avaient par le passé utilisé les lois de la physique et fourni la réponse correcte, ont en majorité répondu en considérant **la d.d.p. égale aux bornes de tous les dipôles** : c'est une attitude cohérente avec les réponses antérieures ($R_1 // R_2$) et qui représente le plus faible travail d'adaptation au nouveau montage.

Sujet $(R_1 + R_2) // R_3$

L'analyse des réponses qualitatives à ce montage est comparable : si en seconde 5 élèves ont fourni la réponse correcte et 6 ont utilisé des lois valables avec des dipôles identiques, la majorité des réponses (23) s'appuie sur la réponse à la question précédente où ils avaient considéré **le générateur à débit constant**. Parmi eux des élèves ont utilisé la loi de la d.d.p. en série (correcte, ou « collège ») et d'autres seulement en dérivation (correcte, ou « collège »). Nous n'avons retenu dans ce tableau que ceux ayant mis en oeuvre deux lois.

En résumé, sur le circuit mixte en fin de seconde les élèves de la séquence ont privilégié soit un raisonnement à base de lois de la d.d.p. (19 / 123), soit un raisonnement à d.d.p. constante (13 / 123). Les seules réponses cohérentes le sont en terme de d.d.p.

En fin de 1^{er}S, les réponses qualitatives se partagent à peu près équitablement entre loi correcte et « collège », tout comme les réponses numériques de seconde ou de première. **Nous retrouvons les représentations qualitatives dans les réponses numériques**, ce qui rend les réponses qualitatives meilleures. En effet pour fournir une réponse chiffrée, l'élève doit lever deux difficultés, passer par deux étapes :

- rechercher la démarche (lois, représentations ...) qui lui permettront de passer de la question à la réponse. Lorsqu'il y a des étapes, c'est pour eux une difficulté supplémentaire que de raisonner en empruntant des étapes qui leur restent à définir : ils choisissent alors le chemin de la facilité, soit le générateur à débit constant, ou mieux le courant constant partout !
- puis mettre en oeuvre sans erreur les outils mathématiques.

Conclusion

L'observation des connaissances acquises par les élèves de la séquence concernant le concept de d.d.p. a révélé une majorité d'élèves mettant en oeuvre les lois pour répondre aux questions qualitatives sur le circuit simple et le circuit avec deux dipôles en dérivation.

Le circuit série, comme les circuits mixtes (réponses qualitatives ou numériques) demandent des étapes et la représentation d'un générateur dont le débit soit susceptible de varier. Le générateur à débit constant constitue un réel obstacle dans la mesure où il offre à l'élève une réponse rapide, facile, économique mais erronée.

Nous avons observé d'autres facilités que la pensée s'octroie. L'élève généralise une propriété valable pour un montage particulier avec deux dipôles identiques à tout montage mixte comportant des dipôles différents, ce qui les conduit à raisonner avec des lois « inédites », telles :

$$U_{PN} = \sum U_R \quad \text{et / ou} \quad U_R = Cte \quad \text{voire même} \quad U_{\text{dipôle}} = \text{constante}$$

On trouve là des étapes, non enseignées, construites de toute pièce par l'élève. Il semble bon que l'enseignant les connaisse pour aider l'élève à en mesurer les limites et l'inviter à aller plus loin.

Nous avons retrouvé ces représentations qualitatives dans les réponses numériques. Les réponses numériques, présentant des difficultés supplémentaires pour l'élève, ont tendance à être à la fois moins nombreuses et de moindre qualité au fur et à mesure que le circuit se complexifie.

II – Réactions des partenaires de l'apprentissage

1 – Evaluation par les élèves

Lors du premier essai, après la séquence nous avons demandé une évaluation de celle-ci aux élèves, à l'aide du questionnaire joint (Annexe VIII). Revenons sur les principales réponses :

La question 3 demandait : « Qu'est-ce qui t'a le mieux aidé à comprendre (expliquer et prévoir) des aspects nouveaux du fonctionnement du circuit électrique : (les classer du plus utile pour toi n°1, un peu moins n°2...) : les relations mathématiques, les analogies, les expériences, autres... ». Voici le

Tableau des réponses des 34 premiers élèves qui ont appris avec la séquence

Classement	1	2	3	4
Aide				
Mathématiques	6	13	12	1
Analogies	11	10	11	1
Expériences	18	10	5	0
Autres :				
- définitions			1	
- exercices			1	3
- schémas				1

Il semblerait que les élèves soient conscients que la démarche qualitative avec **expériences** et **analogies** les ait aidés dans leur compréhension du circuit, puisqu'ils les classent avant les formules.

Par ailleurs, 28 / 34 estiment que cet enseignement leur a permis de **mieux comprendre**, même si :

- des aspects les ont surpris, tout particulièrement l'analogie de la chaîne de vélo ;
- 22 ont trouvé la d.d.p. difficile : elle arrive en tête des « points d'ombre ».

Ils apprécient les expériences et regrettent de n'avoir pas utilisé de logiciel (faute de posséder des ordinateurs au labo !). Il faudrait alors réaliser quelques unes de ces expériences pour rendre la simulation crédible.

Remarque : ils sont 13 à classer les mathématiques en seconde position. C'est, nous semble-t-il, confondre comprendre et résoudre, ce qui nuance ces réponses.

Lors de l'expérimentation dans différentes académies, les enseignants nous ont transmis leurs perceptions du vécu de leurs élèves. Ces observations ont été développées dans la troisième partie, résultats (IV- La séquence vécue par les élèves).

En résumé, il semble que la séquence soit à l'origine d'une **motivation accrue**, qui pourrait être liée :

- aux **prévisions avant expérience**, qui éveillent leur **curiosité** ;
- à la **prise en compte** explicite de leurs **explications** dans le déroulement du cours – certains pensent que ... qu'en pensez-vous ? ... Comment savoir ? Comment le vérifier ?
- à un **enseignement personnalisé**, permis par les réponses aux questionnaires, complétées, lorsque c'est réalisable, par des entretiens ;
- aux **analogies et modèles qualitatifs** qui sont une aide appréciée à la représentation.

2 – Evaluation par les expérimentateurs

2 - a – Le stagiaire

Nous avons déjà décrit (2° partie expérimentation, p.3) sa difficulté à entrer dans un contrat didactique différent de celui qu'il avait vécu comme élève. Passé l'effet de surprise des représentations exprimées par ses élèves, comme le courant statique en circuit ouvert, ou le viol de la loi des nœuds, il a mesuré l'intérêt des questionnaires avant enseignement, la nécessité d'aborder des enseignements non prévus par le programme et l'aide à la représentation des concepts apportée par l'approche qualitative et les analogies. Aussi, en était-il venu à se demander s'il était possible de faire progresser les élèves par les méthodes de l'enseignement habituel. Pour son mémoire professionnel, il a choisi de comparer des réponses d'élèves ayant suivi chacun des enseignements, à des questions portant sur la circulation en circuit ouvert ou fermé, et sur l'intensité.

2 - b – Les enseignants des autres académies

Cherchant à savoir si les observations faites à Brive étaient le fruit d'une situation particulière, ou si elles étaient généralisables, nous avons cherché des enseignants volontaires dans d'autres académies. En fin d'année nous leur avons demandé comment ils avaient vécu cette expérience :

b – 1 - Points positifs

Les questionnaires avant enseignement ont permis la découverte de conceptions :

« permet d'isoler les problèmes liés à l'apprentissage » (Nantes)

« un exemple de conception très répandue que j'ignorais : quand une lampe est dévissée, elle ne brille pas, mais le courant passe quand même, sans la faire briller » (Grenoble)

L'intérêt des analogies :

« Le modèle de la chaîne du pédalier est judicieux pour la compréhension générale. » (Nantes)

« J'ai bien apprécié l'analogie avec la chaîne de vélo. »

La démarche qui permet une prise de sens et une appropriation de la connaissance :

« Cette expérience m'a permis de faire « passer le courant » de façon plus tangible, plus pratique qu'avec l'enseignement classique, et les formules à appliquer. » (Lille)

« faire émerger les représentations des élèves, les faire se confronter à celles de leurs pairs, à l'expérience... pour qu'ils donnent du sens à ce qu'ils apprennent en se l'appropriant et en construisant eux-mêmes leurs savoirs... Déroulement de la séquence sur l'année : je l'ai bien appréhendée, les élèves aussi, je crois. »

b – 2 – Points négatifs

Des enseignants perturbés par la méthode... « *non seulement il insiste beaucoup sur des points jusque là supposés acquis, mais il doit de surcroît faire sans cesse des aller-retours.* » (Nantes)

Lille parle de « *la contrainte que représente la méthode.* »

Grenoble « *regrette un peu de lassitude : il faudrait faire passer le même message avec de temps en temps d'autres présentations de ces questionnaires... sous d'autres formes : jeu, affirmation à confirmer ou réfuter, autres à trouver.* » Elle évoque aussi des difficultés de la mise en place d'un nouveau contrat didactique, tant du côté élève que du côté enseignant.

Conclusion

Il en coûte aux élèves et aux enseignants de changer de contrat didactique. Mais c'est :

- pour l'élève, l'occasion d'un enseignement adapté à son état de connaissance, qui le pousse à s'impliquer dans l'apprentissage ;
- pour l'enseignant, source de découvertes des raisonnements des élèves, et de moyens pour les aider à se rapprocher des modèles du physicien.

A 3 – Dans quelle mesure les hypothèses ont-elles été mises en oeuvre ?

Ce sont elles qui ont piloté la démarche, le choix des outils d'apprentissage, et donc la rédaction de la séquence. Le chercheur les avait présentes à l'esprit tout au long des différentes expérimentations, dans la mesure des possibilités matérielles, en particulier d'entretiens avec les élèves. Mais qu'en a-t-il été des autres enseignants ? Comment savoir ?

Les observations de l'évaluation interne montrent l'apparition des effets attendus de chacune des hypothèses, à chaque expérimentation, quel que soit le lieu et l'enseignant. Il y aurait donc bien quelque chose des hypothèses qui a été mis en oeuvre. Nous avons cherché quelles erreurs, ou démarches reflètent un défaut de mise en oeuvre d'une hypothèse. Elles nous sont apparues plus sensibles sur deux hypothèses : la maîtrise des prérequis et l'approche qualitative. L'approche énergétique et l'introduction indépendante des concepts participaient directement au déroulement de la séquence : on peut imaginer un travail proche quel que soit l'expérimentateur.

I – Maîtrise des prérequis

1 – Circuit et circulation

Parmi les prérequis à tout enseignement, nous avons placé l'enseignement des concepts de circuit et de circulation. Lors du dernier enseignement dans différentes académies, lors du réinvestissement après enseignement il n'y avait plus qu'un élève par classe prévoyant encore l'existence d'un courant d'un côté de l'interrupteur ouvert. Lors de l'évaluation, nous avons posé la question de l'éventuelle importance de la place d'un fusible sur un circuit série. Voici les réponses recueillies dans les deux académies où ont été effectués les suivis :

**Tableau montrant l'importance, attribuée par les élèves,
à la place d'un fusible dans un circuit série**

Lieu	Brive	Grenoble
La place du fusible est importante		
OUI	12 / 35 élèves 34 %	8 / 27 élèves 30 %
NON	23 / 35 66 %	11 / 27 41 %
Bilan	12 / 35 réponses 34 %	8 / 19 réponses 42 %
/ réponses exprimées		

Quel que soit le lieu, la place du fusible est importante pour plus du tiers des élèves ayant fourni une réponse... on est conduit à se demander si le concept de circulation est en place... D'autant, qu'ensuite, lorsqu'on s'intéresse au courant traversant les différents éléments d'un circuit, nous avons rencontré parmi les prévisions qualitatives ou numériques des fils parcourus par une intensité nulle, en circuit fermé.

Tableau des prévisions qualitatives concernant le débit traversant les fils d'un circuit simple fermé

Lieu	Brive	Grenoble	Lille	Nantes
Débit				
Correct à travers tout le circuit	24 / 34 71 %	11 / 28 39 %	10 / 28 36 %	38 / 56 68 %
I fil = 0	8 / 34 24 %	2 / 28 7 %	3 / 28 11 %	8 / 56 14 %
Sans réponse	0	6 21 %	6 21 %	0

En observant ce tableau, on en vient à se demander si c'est une question de circulation ou un phénomène lié à l'apprentissage. Le plus fort taux d'élèves prévoyant un débit nul dans les fils se rencontre dans les académies où tous les élèves ont fourni une réponse, laquelle se trouve être très majoritairement correcte. Cette remarque conduit à penser que cette réponse serait en lien avec l'apprentissage.

2 – La différence de potentiel

La connaissance de la différence de potentiel aux bornes d'un fil et du générateur est nécessaire avant d'aborder celle aux bornes des récepteurs d'un circuit. Ces prérequis ne sont connus que de 60 à 70 % de la population. Cette maîtrise partielle est sans doute à l'origine de la grande dispersion des représentations observée sur les circuits à plusieurs récepteurs.

3 – Les unités

Des difficultés élémentaires ont été relevées lors des réponses aux questions numériques, aux questionnaires passés en fin de seconde, en particulier l'absence de maîtrise des unités par 10 % environ de la population. C'est un aspect non pris en compte lors de l'élaboration de la séquence, l'essentiel de son travail étant qualitatif. Exemple :

Tableau des réponses recueillies à la question V₁
(I en mA, R en Ω , trouver U aux bornes de R)

Enseignant section	Chercheur scientifique	Autre enseignant scientifique	Chercheur Non scientifique	Stagiaire Non scientifique
Réponse				
Correcte	23 / 33	21 / 29	21 / 32	10 / 29
Loi correcte avec erreur d'unité	3 / 33	6 / 29	3 / 32	1 / 29
Sans réponse	1 / 33	0	0	10 / 29

Les unités n'ayant pas fait l'objet d'un enseignement, on observe des lacunes voisines quelle que soit la classe. Par contre, ce tableau révèle un engagement dans la tâche moindre dans la classe non scientifique du stagiaire que dans celle du chercheur, observation qui se répète sur toutes les questions qualitatives, qu'elles portent sur la d.d.p. ou sur l'intensité : 24 % de sans réponse à la question I, par exemple. L'absence de réponse

est un domaine où de nombreux facteurs entrent en ligne de compte, allant de l'ambiance de la classe à la personnalité de l'enseignant, en passant par l'activité demandée.

4 – Les élèves dépourvus de réponse

Le pourcentage d'élèves n'ayant pas fourni de réponse va croissant au fur et à mesure que le circuit se complexifie, ce qui montre qu'on a laissé des élèves en chemin. Le phénomène est plus sensible dans la population non scientifique, ainsi que sur le concept de d.d.p., comme le montre le tableau (exemples pris sur des questions qualitatives où les difficultés mathématiques n'interfèrent pas) :

Tableau des élèves n'ayant pas fourni de réponse

Questionnaire qualitatif, fin de 2°

Concept		Intensité				D.D.P.			
Enseignant		Chercheur	Autre enseignant	Chercheur	Stagiaire	Chercheur	Autre enseignant	Chercheur	Stagiaire
Section		Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Circuit		33 élèves	29 élèves	32 élèves	29 élèves				
Question									
Simple	I	0	0	1	0	0	0	0	2
Simple	II	1	0	1	0	2	1	2	5
Série	III	1	0	6	2	5	3	6	6

II – Approche qualitative

La séquence n'utilise que cette approche, repoussant le formalisme le plus tard possible. Questions, explications à l'aide d'images et d'analogies sont les moyens de se familiariser avec la connaissance. Lors de la recherche d'un progrès par appropriation du vocabulaire on a noté des élèves employant l'image du frein (parfois du chemin) au sujet de la résistance. Les trouve-t-on partout et toujours dans les mêmes proportions ?

Tableau des élèves ayant justifié l'évolution correcte du débit à l'aide de l'image du frein

Questions qualitatives, fin 2°

Enseignant	Chercheur	Autre enseignant	Chercheur	Stagiaire
Section	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Circuit				
Simple	16 / 33	0 / 29	6 / 32	3 / 29
Série	8 / 17	0 / 13	3 / 15	1 / 14

Cette image a été utilisée majoritairement par les élèves scientifiques du chercheur, par quelques élèves non scientifiques du chercheur et du stagiaire, par aucun élève scientifique du collègue. Cette observation montre une perception de plus en plus réduite de son intérêt : bien que présente dans le texte de la séquence, on peut penser que le chercheur en était plus imprégné, a utilisé ces images plus souvent, y a fait référence pour justifier ou expliquer.

De même lors de la dernière expérimentation, la population de Brive a souvent justifié ses prévisions avec des arguments inexistantes dans les autres académies, mais aussi avec un taux supérieur à celui des années passées :

- sur le circuit série, modifié par ajout ou retrait d'une résistance, 22 / 35 soit 63 % des élèves ont utilisé la métaphore du frein : elle se trouve dans 20 / 24 prévisions correctes, soit plus de 80 %, et deux à courant constant ;

- sur le circuit avec dérivation, modifié par ajout ou retrait d'une branche, la métaphore du chemin a été employée dans 15 / 22 prévisions correctes, soit plus de 70 % et aucune prévision fausse.

On peut alors se demander s'il n'est pas nécessaire d'expérimenter plusieurs fois pour mieux mettre en oeuvre ces approches inhabituelles. En effet à Brive non seulement c'est la classe du chercheur, mais c'est également la troisième année d'expérimentation de la séquence avec une 5° classe. On mesure l'étendue du domaine d'utilisation d'un outil à l'usage. Je pense que s'il faut donner du temps à l'élève pour s'approprier une

connaissance, peut-être faut-il aussi laisser du temps à l'enseignant pour qu'il acquiert la maîtrise d'une autre pédagogie ?

Conclusion

La plupart des hypothèses participaient au déroulement de la séquence et on pouvait penser à une mise en oeuvre voisine chez tous les intervenants. Toutefois, de même que lors de l'évaluation interne on a noté un niveau cognitif supérieur à Brive, dans la classe scientifique du chercheur, certaines justifications qualitatives ne se trouvent que dans ces classes et leur proportion croît au fil du temps.

On est conduit à penser qu'une formation des enseignants à la didactique aide à l'exploitation des hypothèses, mais aussi que l'enseignant a besoin de temps pour bien en maîtriser l'usage.

Nous avons par ailleurs relevé des lacunes au niveau de la maîtrise des prérequis, peu en début d'apprentissage, de plus en plus au cours du temps, qui peuvent expliquer :

- un taux croissant d'élèves ne fournissant pas de réponse comme
- la dispersion des prévisions, observée sur le débit dans les branches des circuits mixtes, ou sur la d.d.p. dans les circuits à deux dipôles.

Cette maîtrise nécessite du temps pour rencontrer les élèves en entretien, temps qui a parfois manqué au chercheur, ainsi qu'une formation pour les mener que les autres enseignants n'avaient pas. Ces entretiens auraient permis des remédiations individualisées, nouvelle occasion de comprendre.

III – Comment affiner l'intervention en vue d'une meilleure gestion des hypothèses?

Au cours des analyses qui précèdent, nous avons été amenés :

- à différencier le comportement des élèves :
 - o du chercheur de celui des élèves des autres enseignants, donc à réfléchir à l'impact d'une formation ou comment transmettre la séquence,
 - o selon la section scientifique, indifférenciée ou non scientifique, donc à mesurer l'influence d'une certaine homogénéité au sein d'un même classe,
- à signaler le temps nécessaire au bon déroulement de la séquence et à déplorer l'absence d'espace libre pour des entretiens.

Nous revenons sur ces différents points :

1 – Transmission de la séquence

Tous les enseignants étaient en lien avec un I.U.F.M., ceux de Nantes étaient de plus stagiaires. Les collègues de Lille et Grenoble étaient en recherche d'essais d'autres pédagogie. Voici, par exemple, les commentaires venus de Grenoble, après lecture de la séquence et avant son expérimentation : *« J'y trouve tout à fait mes préoccupations et mes convictions... Le prof est un médiateur fournissant les occasions de l'apprentissage. »* Au contraire, on peut penser les stagiaires peu réceptifs à un enseignement différent, puisque ce sont eux les plus « perturbés » par la méthode qui « ne correspond pas encore à la conception de l'enseignement en lycée. »

On peut penser que les enseignants de sciences physiques constituent une population fort hétérogène, plutôt rodée à la transmission d'un savoir, mais consciente de son peu d'efficacité. Nous devons les conduire à envisager une révolution au niveau du contrat didactique, que nous savons au moins aussi déstabilisante pour le maître que pour l'élève. Pour qu'ils acceptent de changer de pédagogie, nous pouvons suivre la démarche adoptée vis à vis des élèves. Nous pouvons commencer par les sensibiliser aux représentations :

1 – a – Sensibilisation aux représentations

Lors d'une présentation de la recherche devant les professeurs stagiaires de l'I.U.F.M. de Limoges nous avons commencé par leur demander de répondre au questionnaire de J.L. Closset, dans le but de l'utiliser comme support pour l'exposé des différents raisonnements en électrocinétique. Puis, nous leur avons demandé s'ils avaient rencontré ces raisonnements chez leurs élèves : non seulement ils retrouvaient des réponses d'élèves mais reconnaissaient : « *nous raisonnons comme ça.* » Les enseignants actuels qui ont souvent eu une approche essentiellement mathématique de la physique, avec des lois ou des formules à appliquer, se trouvent assez dépourvus de représentations qualitatives. A l'issu d'un passage de questionnaire dans sa classe, je demandais à une collègue ce qu'elle en pensait. Sa réaction, dans un soupir, a été « *il faut réfléchir* »...

Il paraît donc essentiel de faire prendre conscience à l'enseignant de l'**existence** de représentations, les siennes et celles des élèves... et du mode d'analyse qui en découlent sur différents circuits. Cette première étape est intéressante car elle permet de comprendre certaines erreurs récurrentes qui agacent généralement les enseignants.

Une fois cette existence reconnue, il convient d'expliquer le **rôle** des représentations : elles servent de grille de lecture, qui filtre, modifie l'information, c'est à dire ce qu'un enseignement transmissif prétend apporter, pour l'adapter aux structures en place. C'est une des manifestations de leur **résistance** : elles se sont construites jour après jour, au fil des ans, dans l'interaction entre l'élève et son environnement. Un cours, déconnecté de la vie, ne suffit donc pas pour inciter l'élève à en changer. Il va au mieux considérer l'exemple choisi comme une exception où « sa loi » est inapplicable. Si l'élève est sérieux, s'il le retrouve dans un exercice il l'utilisera, mais sur tout autre exemple il reviendra à « sa loi » dont l'efficacité quotidienne n'est plus à prouver.

1 – b – Réflexion sur les pôles du triangle didactique

b – 1 – La nature de la connaissance scientifique

Nous aurons à faire prendre conscience aux enseignants de la nature du savoir enseigné, de sa distance au réel et aux représentations de l'élève, de ce qu'est un modèle, son rôle et la nécessité d'une transposition didactique : le modèle que nous avons pensé accessible à des élèves de seconde et les étapes de sa construction, en lien avec ce que nous savons de l'apprentissage :

b – 2 – Comment l'élève apprend

Il part toujours de ce qu'il sait déjà et avance en interaction avec son environnement. Pour acquérir des connaissances nouvelles il faut être en mesure de changer de point de vue (ce qui peut se révéler, pour certains élèves, psychologiquement impossible), et pour cela avoir réalisé les limites de ses représentations. C'est à dire que pour apprendre, il doit être confronté à un problème, et avoir à charge de le résoudre. Il doit avoir à s'adapter à un milieu facteur de contradiction.

Quelles interactions participent à l'apprentissage ?

Les représentations, l'expérience, les autres et le maître. Comment ?

Nous avons choisi la démarche qui consiste à poser à l'élève une question sur une situation concrète. Pour répondre l'élève utilise ses **représentations** pour prévoir et argumenter. Ces prévisions seront confrontées à celles des **autres**, puis à l'**expérience**. S'il y a mise en défaut, alors naît un problème. Les observations viennent déstabiliser les conceptions et font apparaître un besoin de comprendre.

Quels rôles pour le maître ? Le maître a le choix des situations favorables à l'apprentissage visé, à commencer par :

- imaginer la situation initiale adéquate, où les représentations seront mises en défaut par l'expérience, et où le savoir enseigné prendra tout son sens, puis
- le choix des étapes (transposition didactique) par lesquelles passera l'apprentissage, des moyens permettant à l'élève d'organiser les ruptures nécessaires avec la connaissance ancienne et les aides pour accéder à la connaissance nouvelle. C'est à dire comment :
 - o faire naître le besoin du concept.,
 - o puis comment permettre sa construction progressive.

Pour cela il doit :

- penser aux prérequis indispensables dont la maîtrise est à vérifier par des pré-tests ;

- mobiliser les structures d'accueil qui doivent être disponibles à l'élève : elles permettront au nouvel apprentissage de s'accrocher puis de se fixer ;
- être attentif aux erreurs qui peuvent être la traduction d'une forme de connaissance, des étapes utiles à l'élève qui traite, ce qui est devenu sa question ou son problème, avec ses outils conceptuels. Cette progression est lente, tâtonnante, avec d'inévitables retours en arrière ;
- rendre la connaissance utile sur des situations nouvelles, afin de la décontextualiser, et que l'élève étende peu à peu son domaine de validité.

Ainsi le maître gère le processus d'apprentissage en interaction avec les stratégies de l'apprenant. Dans ce processus l'élève est actif, curieux, a soif de comprendre et il naît une certaine complicité entre le maître et l'élève, propice au désir d'apprendre.

C'est à partir de ces connaissances qu'il faut envisager la gestion des interactions en classe où le maître est tantôt **tuteur**, tantôt **médiateur**. C'est l'origine des hypothèses qui constituent l'ossature de la séquence. Elles ont été choisies en sachant :

- l'importance de la maîtrise des prérequis avant d'envisager un apprentissage ;
- la nécessité d'aborder l'énergie, aspect du circuit auquel l'élève est sensible, à la base de ses représentations ;
- le rôle de ces représentations, d'où la place tenue par les questionnaires avant enseignement, à l'origine des débats entre pairs, et d'observations expérimentales jugées paradoxales par l'élève, déstabilisantes, première étape de l'apprentissage ;
- l'intérêt d'une approche qualitative (aide à la représentation), lente et progressive, au rythme de l'élève, avec de nombreux réinvestissements ;
- l'attention portée au vocabulaire de l'élève, l'importance de demander des reformulations, signes de l'état de sa compréhension, étapes nécessaires pour lui vers une connaissance scientifique.

En résumé, nous aurions d'abord à sensibiliser les enseignants aux représentations, à l'état réel des connaissances avant enseignement, puis à les initier à comment l'élève apprend, et en particulier de la physique. Pour cela il utilise ses représentations dont il doit mesurer les limites, pour que naisse le besoin du concept. Il doit être actif pour construire des connaissances nouvelles, puis éprouver leur pouvoir explicatif et prédictif sur des exemples variés. Ce qui conduit à repenser le rôle du maître et la place de l'expérience, test d'hypothèses : elle permet la dévolution, l'enrôlement de l'élève dans la tâche. Il est alors heureux de faire ce qu'il fait.

2 – Nécessité de moyens horaires

La séquence a nécessité un horaire pratiquement double de celui officiellement accordé à l'électricité en classe de seconde. Il est vrai, pour faire autre chose : au lieu de tenter de les familiariser à un formalisme mathématique déconnecté de toute réalité physique, nous avons au contraire, par une approche qualitative, tenté de leur permettre la construction d'une représentation des concepts avant de les symboliser par des lettres, et leurs propriétés, par des relations mathématiques.

En consultant les idées directrices ainsi que les documents d'accompagnement du programme d'électricité actuellement en place au collège, nous avons constaté que les objectifs ainsi que le temps consacré à cette partie pourraient correspondre au déroulement de la séquence. Ce serait un champ nouveau d'application de nos choix. Cette idée nous réjouit à plus d'un titre.

Etaler l'apprentissage sur plusieurs années **éviterait la lassitude** observée. Cela **permettrait** aux élèves **de réinvestir** la connaissance construite sur les circuits à un ou deux récepteurs, aux circuits plus complexes. Le but étant la maîtrise des concepts d'intensité, de différence de potentiel, de conducteur résistant et de résistance équivalente. Que l'élève ait tous ces outils disponibles et pense à y faire appel quand le besoin s'en fait sentir.

Cela constituerait un allègement substantiel du programme d'électricité au lycée : si au collège, l'élève avait le temps de prendre conscience de la nouveauté de la connaissance scientifique, et de la structurer, de prendre possession des concepts d'un point de vue qualitatif, cela laisserait le temps de réfléchir au passage au formalisme.

L'élève aurait abordé l'électricité d'une manière plus vivante, plus attrayante, plus interactive que la mise en oeuvre de formules mathématiques, l'apprentissage des unités... Cela éviterait peut-être qu'il arrive en seconde avec **des préjugés défavorables** dont il met un certain temps à revenir (certains ne s'en remettent jamais !) : trop de temps passé pour toujours ne rien comprendre... Puisse cette approche les aider à aimer la physique !

Par ailleurs, des espaces de remédiation sont officiellement mis en place dans les matières jugées fondamentales. A l'heure où les médias déplorent une hémorragie alarmante chez les étudiants scientifiques, où l'on en vient sérieusement à se demander comment attirer des élèves vers des études scientifiques... peut-être la physique pourra-t-elle bénéficier de tels espaces. Ils apparaissent nécessaires si on veut faire avancer tous les élèves d'une même classe au « même rythme » en classe.

3 – Intérêt de sections différenciées

Nos analyses nous ont conduit à établir deux constats :

- Brive avec des sections différenciées, même avec un enseignant sans formation particulière à la didactique, avait de meilleurs résultats que les élèves des classes indifférenciées d'autres académies ;
- Une séance de T.P. avec tests d'hypothèses de trois heures, avec le chercheur, en option sciences expérimentales en première scientifique, a permis à des élèves d'accéder au raisonnement correct sur le circuit simple et le circuit série, de réinvestir l'image du frein, même six mois plus tard (en fin de 1^{er}S).

Ces constats semblent en cohérence avec la pédagogie de la maîtrise : partir d'une base commune, de centres d'intérêt proches, d'une même envie de comprendre permet des progrès plus rapides et plus solides pour plus d'élèves.

Cette démarche va à contre courant des consignes officielles actuelles, contournées semble-t-il par certains, qui se trouvent parfois (comme nous à Brive) sommés d'obéir, suite à un audit (inspecteur de biologie, venu se renseigner sur nos pratiques, pourtant officielles, puisque figurant sur le projet d'établissement).

B - Prise de repères externes

Avant de prétendre mettre en regard le comportement d'élèves ayant suivi la séquence avec celui d'élèves ayant suivi un autre enseignement, il paraît nécessaire de se demander si :

- les deux enseignements avaient les mêmes objectifs d'apprentissage ;
- les deux populations étaient comparables avant l'enseignement suivi en classe de seconde, puis de préciser les populations ayant permis ces prises de repères avant et après enseignement.

I – Remarques préliminaires

1 – Objectifs d'apprentissage

Les objectifs d'apprentissage que le chercheur se fixe pour l'élève au travers de la séquence sont-elles en concordance avec les finalités du programme ? Voici les **compétences exigibles** de la partie électricité, courant continu : « on attend que l'élève sache :

- ... que la tension est une grandeur algébrique ...
- la loi d'additivité des tensions
- que deux points d'un circuit reliés par un fil de cuivre sont pratiquement au même potentiel
- distinguer un générateur de tension d'un générateur possédant une résistance interne et définir le schéma électrique équivalent
- que la tension est une mesure d'un état électrique
- que tension nulle ne signifie pas nécessairement intensité nulle
- qu'intensité nulle ne signifie pas nécessairement tension nulle
- la loi des nœuds et sa signification physique : loi universelle de conservation de la charge
- la loi d'Ohm pour un conducteur Ohmique
- le rôle d'un rhéostat
- les lois d'association des résistances. »

ainsi que les **commentaires** :

« Cette première partie correspond aux deux objectifs suivants : mettre au point la **formulation** et l'**exploitation** méthodique des **lois fondamentales** concernant **tension et intensité** déjà rencontrées dans les programmes de 4° et de 3°. Par rapport à ces programmes, aucun concept nouveau n'est introduit. Il s'agit d'un **approfondissement des concepts tension et intensité** ... et également de l'**assimilation des lois** indiquées »

La maîtrise du programme par les élèves est une contrainte d'enseignement. Il se trouve que nos **objectifs** étaient de **donner du sens aux concepts I – U – R**, avant de les relier par la loi d'Ohm : ils semblent en cohérence avec le programme..

2 – Comparaison des représentations à l'entrée en seconde

Dans le cadre de la pédagogie de la maîtrise, nous avons toujours cherché à connaître l'état initial des représentations des élèves à propos du circuit et de la circulation comme de la résistance et de la « tension ». Des questionnaires ont été passés en fin de troisième, puis aux élèves qui apprenaient avec la séquence, à chaque essai de 1994 à 1999 à Brive et dans les autres académies. Les observations ont été décrites à l'occasion des analyses préalables pp. 32-49 et 109-112. Quels que soient l'année, le lieu, les questions posées, s'il apparaît des variantes dans le détail de la dispersion des représentations, les grands axes des raisonnements initiaux sont communs :

- leur **caractère non circulatoire** qui conduit autour de la moitié des populations testées à affirmer :
 - o l'existence d'un courant quelque part en circuit ouvert, ou
 - o l'absence de courant quelque part en circuit fermé, le plus souvent à l'intérieur de la pile
 - o et au viol de la loi des nœuds ;
- une forte sensibilité aux échanges énergétiques ;
- la plus forte cohérence avec le raisonnement séquentiel ;
- l'absence du concept de d.d.p., la pile étant caractérisée par un débit constant.

3 – Populations participant à la prise de repères

Les populations qui ont participé aux prises de repères avant enseignement, puis en fin de classe de seconde venaient en premier du lycée d'Arsonval à Brive. Parmi elles, certains élèves avaient fait le choix d'études scientifiques. Les élèves appartenaient à quatre classes, dont :

- deux ont suivi l'enseignement de la séquence, l'une avec le chercheur et l'autre l'enseignant X ;
- deux ne l'ont pas suivi, l'une ayant pour enseignant X, et l'autre Y.

D'autres élèves qui n'avaient pas encore de projet professionnel appartenaient à des classes dites « indifférenciées », mais que nous nommerons « non scientifiques ». Parmi elles, quatre classes ont répondu à nos questionnaires, dont :

- deux ont suivi l'enseignement de la séquence, l'une avec le chercheur, l'autre avec son stagiaire ;
- deux ne l'ont pas suivi, l'une ayant pour enseignant Y et l'autre un stagiaire.

L'année suivante les populations ayant participé aux prises de repères venaient de différentes académies, appartenaient à des classes vraiment indifférenciées (à l'exception de la classe scientifique du chercheur à Brive). Parmi elles, 50 élèves de Grenoble et 18 de Lille, ayant suivi un autre enseignement, ont servi de population de référence.

Nous allons fournir les réponses de ces populations, parmi lesquelles des élèves ont suivi un enseignement avec le souci de la maîtrise de prérequis, une approche qualitative, énergétique, progressive et indépendante des concepts alors que les autres ont suivi l'enseignement simplement conforme aux programmes, avec des méthodes pédagogiques habituelles. Cette prise de repères montre un effet global de ces enseignements chez des élèves scientifiques (Brive), indifférenciés (ailleurs) ou non scientifiques (Brive), ayant travaillé avec des enseignants différents. La comparaison stricte des résultats obtenus avec les élèves ayant suivi la séquence et ceux obtenus avec la population servant de repère, impliquerait un contrôle draconien de trop de variables pour qu'il soit possible de tirer des conclusions rigoureuses. C'est pourquoi nous présentons cette mise en parallèle, à titre indicatif, en laissant le lecteur libre de son jugement.

II – Observation de l'engagement de l'élève dans l'apprentissage

A chaque passage d'un questionnaire final, quelque soit le lieu, le texte, l'année, en fin de seconde ou de première S, nous avons relevé une différence significative du nombre d'élèves ne fournissant pas de réponse. Ceux que nous avons pu rencontrer en entretien avouaient « *je ne sais pas faire* » et nous constatons l'absence de représentation du concept.

Voici, rassemblés dans des tableaux, les élèves restés sans réponse, au questionnaire final passé à Brive (Annexe VI.5-14), sur les circuits à un ou deux récepteurs (questions qualitatives de I à III), et numériques (V) :

Elèves restés sans réponse aux questions portant sur l'intensité

Fin de seconde, Brive

Enseignement Question / Section / circuit	Séquence scientifique	Habituel scientifique	Séquence non scientifique	Habituel non scientifique
I simple	0 / 62 0 %	4 / 67 6 %	1 / 61 2 %	4 / 47 8 %
II simple évolutif	1 / 62 2 %	4 / 67 6 %	2 / 61 3 %	4 / 47 8 %
III série	1 / 30 3 %	6 / 34 18 %	5 / 29 17 %	7 / 24 29 %
III dérivation	0 / 32 0 %	5 / 33 15 %	2 / 32 6 %	5 / 23 22 %
V₁ simple	2 / 62 3 %	10 / 67 15 %	9 / 61 15 %	13 / 47 28 %
V₂ série ou dérivation	10 / 62 16 %	31 / 67 46 %	31 / 61 51 %	31 / 47 66 %
V₃ mixte : débit du générateur	30 / 62 48 %	49 / 67 73 %	42 / 61 69 %	33 / 47 70 %

Elèves restés sans réponse aux questions portant sur la différence de potentiel
Fin de seconde, Brive

Enseignement Question / circuit	Séquence scientifique	Habituel scientifique	Séquence non scientifique	Habituel non scientifique
I simple	0 / 62 0 %	4 / 67 6 %	2 / 61 3 %	1 / 47 2 %
II simple évolutif	3 / 62 5 %	12 / 67 18 %	7 / 61 11 %	8 / 47 17 %
III série	3 / 30 10 %	8 / 34 23 %	3 / 29 10 %	10 / 24 42 %
III dérivation	3 / 32 9 %	9 / 33 27 %	9 / 32 28 %	6 / 23 26 %
V₁ simple	1 / 62 2 %	7 / 67 10 %	10 / 61 16 %	14 / 47 30 %
V₂ série ou dérivation	3 / 62 5 %	11 / 67 16 %	17 / 61 28 %	18 / 47 38 %
V₂ rép. incomplètes	6 / 62 10 %	3 / 67 4 %	6 / 61 10 %	3 / 47 6 %

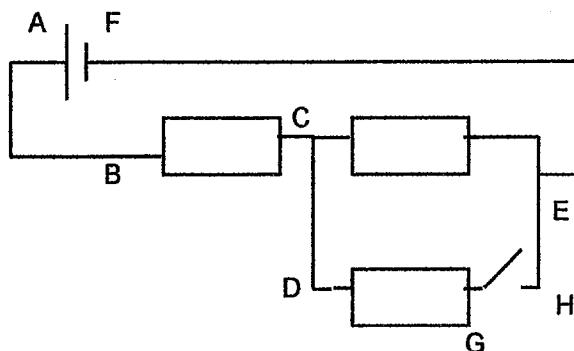
Quelle que soit la question qualitative ou numérique, quel que soit le circuit, simple ou à plusieurs récepteurs, le classement est pratiquement toujours le même. Les élèves qui fournissent le plus de réponses, complètes ou incomplètes sont les élèves scientifiques de la séquence puis les non scientifiques de la séquence ou parfois les scientifiques de l'autre enseignement, enfin les non scientifiques de l'enseignement habituel.

La séquence paraît entraîner dans la tâche d'apprentissage, autant les élèves non scientifiques que l'enseignement habituel les élèves scientifiques : elle semble avoir un effet sur la motivation, ce qui accroît le nombre d'élèves qui entrent dans le « jeu », sous réserve que cette observation ne prend pas en compte des facteurs comme la personnalité de l'enseignant. La séquence apparaît d'autant plus efficace qu'elle s'adresse à des élèves ayant un projet scientifique.

III – Utilité d'enseigner ce qu'on a l'habitude de considérer comme évident

Nous avons déjà signalé l'existence de parcelles de connaissance absentes de l'enseignement habituel comme le fil, en dehors de la d.d.p. à ses bornes considérée nulle, ou le circuit ouvert. Dans le cadre de la maîtrise des prérequis, connaissant les représentations des élèves concernant le circuit et la circulation, nous avons jugé nécessaire d'ajouter ce chapitre en « avant-programme ». Notre stagiaire, L. Jourdes a désiré en évaluer la nécessité, non a priori comme nous, mais à partir de réponses d'élèves, en fin d'année, selon l'enseignement suivi (ce qui constitue une part de son mémoire professionnel, Annexe VII).

Voici sa première question :



Dans quelles portions du circuit existe-t-il un courant ?

Entourer les réponses exactes :

AB	oui	non	je ne sais pas
BC	oui	non	je ne sais pas
CE	oui	non	je ne sais pas
DG	oui	non	je ne sais pas
HE	oui	non	je ne sais pas
EF	oui	non	je ne sais pas

Elle cherchait à savoir si l'élève prévoyait :

- une circulation en circuit fermé, soit entre les points A B C E F
- une absence de circulation en circuit ouvert, soit entre les points C D G H E

Voici le tableau des élèves ayant fourni la réponse correcte :

Enseignement	Séquence / 96 élèves		Habituel / 83 élèves	
circuit	fermé	ouvert	fermé	ouvert
% réponses correctes	82	91	65	53

Il a pu constater « qu'entre 82 et 91 % des élèves ayant appris avec la séquence affirment qu'il y a une circulation du courant dans un circuit fermé et pas de circulation dans un circuit ouvert. Ceci montre une évolution car avant enseignement on avait 58 % des élèves qui pensaient le contraire dans le cas du circuit ouvert. Par contre les autres élèves sont toujours aussi nombreux à imaginer l'existence d'une circulation en amont d'un interrupteur ouvert.

Il semblerait nécessaire de faire acquérir cette notion aux élèves, car l'enseignement en accord avec les programmes ne permet pratiquement pas d'évolution de leurs représentations dans ce domaine. »

Cette préoccupation, au sujet de l'existence d'une circulation en circuit ouvert, était visée par sa **question 3**, composée à partir de deux circuits possédant chacun une pile et de deux lampes en série, l'un fermé et l'autre ouvert, les deux lampes étant alors séparées par un interrupteur ouvert. Il demandait d'indiquer, en les entourant, les lampes qui s'allument. Voici le tableau des élèves ayant fourni la réponse correcte :

Enseignement	Séquence / 96 élèves		Habituel / 83 élèves	
circuit	fermé	ouvert	fermé	Ouvert
% réponses correctes	100	96	88	57

« Les réponses fournies sont cohérentes avec celles de la question 1. Ce circuit est plus simple, la notion de circuit et de circulation semble acquise par les élèves de la séquence dans le cadre du circuit simple... Les élèves raisonnent mieux sur les circuits simples, les notions sont parfaitement acquises pour des circuits simples et correctement sur le circuit mixte.

Les élèves de l'enseignement habituel utilisent à plus de 40 % un raisonnement séquentiel expliqué par J.L.Closset sur le circuit ouvert, alors que cette représentation du circuit ouvert a pratiquement disparu chez les élèves de la séquence. » Ce constat, avait déjà été établi par J.L.Closset (1983) ou S.Johsua (1985) qui retrouvent, à un niveau universitaire, de telles représentations.

En résumé, cette étude illustre l'absence d'évolution de la représentation du circuit ouvert chez les élèves de l'enseignement habituel : cet enseignement n'en parle pas, ce qui implicitement conforte l'élève dans son idée.

Ce travail incite à penser qu'il serait nécessaire d'aborder le circuit ouvert, prérequis à tout autre enseignement de l'électricité... c'est à dire en classe de 4°.

IV – Evolution du niveau cognitif de maîtrise des concepts liés par la loi d'Ohm

1 – Concept d'intensité

L'évolution de la représentation de ce concept par les élèves de la séquence a été analysée, lors du retour sur les hypothèses, dans la recherche d'un progrès par des prévisions différentes. Maintenant nous pouvons compléter le tableau de la page 25 avec les raisonnements des élèves ayant suivi l'enseignement

habituel. Il établissait une comparaison de l'évolution du raisonnement de l'élève sur le circuit simple avant enseignement et sur le circuit série en fin d'année 2000, en lien avec l'enseignement reçu :

Tableau de l'évolution des raisonnements concernant l'intensité le long d'un circuit série, en fonction de l'enseignement reçu

Fin 2000, élèves de 4 académies

Raisonnement Population	local	séquentiel	à courant constant	systémique
Avant enseignement 90 élèves	28 %	54 %	3 %	15 %
Après la Séquence 146 élèves	9 %	15 %	15 %	51 %
Bilan	- 19 %	-39 %	+ 12 %	+ 36 %
Après l'enseignement habituel 68 élèves	19 %	40 %	9 %	19 %
	- 9 %	- 14 %	+ 6 %	+ 4 %

Ce tableau met en évidence que les deux enseignements conduisent tous les raisonnements à évoluer dans le même sens, à savoir une **diminution des raisonnements locaux et séquentiels** et un **progrès des raisonnements à courant constant et systémique**. Seulement la séquence conduit à

- une diminution double du raisonnement local et presque triple du raisonnement séquentiel et
- une augmentation double du raisonnement à courant constant et d'un facteur 9 du raisonnement systémique, ce qui revient à dire qu'elle aurait, en fin d'année, une efficacité supérieure.

Une autre façon de mesurer l'état de sa connaissance peut être d'observer, tout au long du questionnaire qualitatif (Annexe VI. 5-14), quel est le **raisonnement cohérent le plus représenté** chez les élèves. C'est ce qui a été fait suite au questionnaire passé en mai 99, dont voici les résultats :

Tableau des raisonnements cohérents sur l'ensemble du questionnaire

Fin 1999, Brive

Raisonnement Enseignement	local	séquentiel	à courant constant	correct	Total
Séquence 64 élèves	6 %	6 %	20 %	37 %	70 %
Habituel 56 élèves	7 %	36 %	21 %	2 %	66 %

Le raisonnement cohérent le plus représenté dans la séquence est le raisonnement correct, alors que dans l'autre population, c'est toujours le raisonnement séquentiel.

Il y a 4 élèves de la séquence (8 %) qui n'ont pas fourni de réponse à la dernière question et 15 de l'enseignement habituel (27 %).

Ces observations indiquent, au niveau des élèves de la séquence, une amélioration :

- de l'engagement dans la recherche de réponse à une question ;
- du niveau du raisonnement cohérent.

Au sujet de l'intensité, on a également eu l'occasion de comparer les réponses fournies à des questions numériques, plus familières pour les élèves de l'enseignement habituel, peu habitués au qualitatif. Voici, par exemple les réponses recueillies à la première question (Annexe VI. 9 ;14), sur le circuit simple :

**Tableau (a) des élèves respectant l'unicité du débit sur le circuit simple,
en fonction de l'enseignement et de leur projet**
Fin 1999, Brive

Projet	Scientifique	<i>Scientifique</i>	Non scientifique	<i>Non scientifique</i>
Enseignement effectif	Séquence 62 élèves	<i>Habituel</i> 67	Séquence 61	<i>Habituel</i> 47
Acquis	97 %	78 %	80 %	64 %
Non acquis	1,5%	7 %	5 %	8 %
Sans réponse	1,5 %	15 %	15 %	28 %

Sur cette propriété de l'intensité qui paraît être une base élémentaire, l'enseignement de la séquence semble avoir permis :

- à la population scientifique de partager la représentation scientifique à 97 %
- à la population non scientifique de la partager avec un taux proche de celui de la population scientifique n'ayant pas suivi cet enseignement.

Les mêmes observations peuvent se renouveler, par exemple sur le circuit mixte (questions V₃) :

**Tableau (b) des élèves respectant l'unicité du débit
le long de la branche principale**

Projet	Scientifique	<i>Scientifique</i>	Non scientifique	<i>Non scientifique</i>
Enseignement effectif	Séquence 62 élèves	<i>Habituel</i> 67	Séquence 61	<i>Habituel</i> 47
Acquis	34 %	12 %	13 %	19 %
Non acquis	13 %	13 %	13 %	10 %
Sans réponse	52 %	75 %	74 %	70 %

**Tableau (c) des élèves respectant l'unicité du débit
le long d'une branche dérivée**

Projet	Scientifique	<i>Scientifique</i>	Non scientifique	<i>Non scientifique</i>
Enseignement effectif	Séquence 62 élèves	<i>Habituel</i> 67	Séquence 61	<i>Habituel</i> 47
Acquis	40 %	21 %	22 %	30 %
Non acquis	6 %	9%	6 %	9%
Sans réponse	53 %	70 %	72 %	61 %

Comparons l'acquis des deux populations scientifiques :

- l'écart existe sur le circuit simple (tableau -a-)
- l'acquis est double le long d'une branche dérivée (tableau -c-)
- triple le long de la branche principale (tableau -b-).

Dans tous les cas les élèves non scientifiques ayant suivi la séquence arrivent à un acquis proche, de celui des élèves scientifiques ayant suivi l'enseignement habituel. Les étapes ci-dessus sont les trois étapes d'apprentissage de la circulation rencontrées lors des réinvestissements de la séquence.

2 – Concept de d.d.p.

Lors du questionnaire passé en mai 99 (Annexe VI. 9 ; 14), on a observé le degré d'acquisition des différentes propriétés, suivant la section et l'enseignement reçu. Nous avons regroupé les réponses numériques portant sur la d.d.p. aux bornes de différents éléments :

2 – a – D.d.p. aux bornes du générateur

**Tableau de la fréquence des réponses numériques concernant
la d.d.p. aux bornes du générateur**

Questions V₃

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement Réponse effectif	Séquence 62 élèves	Habituel 67	Séquence 61	Habituel 47
$U_g = Cte$ I_g varie	32 %	2 %	10 %	2 %
$U_g = Cte$ $I_g = Cte$	31 %	13 %	23 %	13 %
U_g varie $I_g = Cte$	26 %	61 %	33 %	30 %
Sans réponse	11 %	24 %	34 %	55 %

Le pourcentage d'absence de réponse va croissant d'une catégorie à sa voisine de droite, montrant une absence de représentation de ce concept pour le quart des élèves scientifiques et plus de la moitié des élèves non scientifiques ayant suivi l'enseignement habituel.

Certains ont bien appris à distinguer les deux concepts mais en permutent les propriétés : la d.d.p. varierait alors que le débit resterait constant : c'est la réponse la plus représentée chez tous les élèves à l'exception des élèves scientifiques de la séquence dont un tiers fournit la réponse correcte.

Cette lacune sur une base de départ indique que l'avancement de l'apprentissage serait à revoir dans tous les cas. Cette propriété fondamentale entre en concurrence avec l'idée plus répandue du **générateur à débit constant**, conservée par la majorité des élèves ayant fourni une réponse, toutes populations confondues. Il reste à imaginer des situations-problèmes qui puissent aider l'élève à franchir cet obstacle.

On peut relire le tableau précédent en regroupant les réponses avec le souci des acquis :

Tableau des acquis des élèves concernant la d.d.p. aux bornes du générateur

Fin 1999, Brive

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement Réponse effectif	Séquence 62 élèves	Habituel 67	Séquence 61	Habituel 47
U_g constante	63 %	15 %	33 %	15 %
I et U propriétés différentes :	58 %	63 %	43 %	32 %
dont, conformes à la physique :	32 / 58 55 %	2 / 63 2 %	10 / 43 23 %	2 / 32 7 %

Un générateur possède une d.d.p. constante à ses bornes : cet acquis apparaît deux fois plus souvent chez les élèves non scientifiques ayant suivi la séquence que chez les autres élèves scientifiques ; sa fréquence est multipliée par quatre chez les élèves scientifiques ayant suivi la séquence.

Ce sont les élèves scientifiques qui, dans les deux enseignements, ont le mieux appris à distinguer les deux concepts. Parmi ces élèves, ceux qui connaissent le mieux la d.d.p. aux bornes du générateur se trouvent être ceux qui ont appris avec la séquence : on peut semble-t-il noter une influence positive de la séquence, face au débit constant du générateur.

Cette analyse illustre une efficacité de la séquence supérieure avec des élèves aux projets scientifiques.

2 – b - D.d.p. aux bornes du fil

Comme tout conducteur soumis à une d.d.p., le fil est parcouru par un courant. Comme il est un très bon conducteur, la d.d.p. à ses bornes est faible. A ce niveau d'étude, on a l'habitude de la négliger et même d'écrire $U_{fil} = 0$.

Observons les représentations des élèves :

Tableau des réponses concernant la d.d.p. aux bornes d'un fil

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement	Séquence	Habituel	Séquence	Habituel
Réponse effectif	62 élèves	67	61	47
$U_m = 0$	68 % élèves	34 %	31 %	4 %
$I_m \neq 0$	82 % réponses	59 %	61 %	12 %
Sans réponse	14 %	42 %	49 %	66 %

Par ailleurs, il s'est trouvé 5 élèves de la séquence pour affirmer que l'intensité qui traverse un fil est nulle alors qu'il n'y en a pas dans le reste de la population non scientifique ! On peut penser qu'on assiste là à une confusion des connaissances, correspondant à une phase d'apprentissage (statut de l'erreur) qui va jusqu'à remettre en cause l'idée même de circulation ... erreur qui se retrouve dans la population scientifique hors séquence chez 7 élèves.

Pour ceux qui distinguent les deux concepts U et I au niveau du fil, les propriétés sont le plus souvent celles de la physique. Elles sont connues des deux tiers des élèves scientifiques et du tiers des élèves non scientifiques de la séquence, comme du tiers des élèves scientifiques ne l'ayant pas suivi. La séquence semble avoir permis une représentation du concept pour un nombre double d'élèves scientifiques et la représentation exacte de la d.d.p. aux bornes d'un fil pour la majorité des réponses fournies.

Ce dipôle est trop simple, trop usuel pour qu'on y consacre du temps (tout comme l'interrupteur... ouvert) alors que son comportement mériterait d'être étudié.

Les élèves ayant fourni la même prévision pour l'intensité et la d.d.p. sont 41 à les imaginer tous les deux non nuls (et 7 à les imaginer tous les deux nuls) ce qui fait penser pour la majorité d'entre eux à une représentation monoconceptuelle en terme de courant, donc non nuls, ce en quoi ils n'ont pas tout à fait tort... leurs connaissances resteraient à préciser.

2 - c - D.d.p. aux bornes des éléments d'un circuit simple

Les réponses, lorsqu'elles existent sont essentiellement de 2 sortes :

- la d.d.p. du générateur se répartit aux bornes des dipôles, ce qui veut dire, en négligeant celle aux bornes des fils $U_{\text{générateur}} = U_{\text{récepteur}}$ (Loi U)
- mais certains travaillent avec une seule notion pour décrire le circuit, celle de courant, et prévoient $U = \text{Constante tout le long.}$ (Loi I)

Les autres réponses, faute de justification, semblent ne correspondre à aucun schéma organisé.

Réponses à la question sur la d.d.p. aux bornes des éléments d'un circuit simple

Question V_1

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement	Séquence	Habituel	Séquence	Habituel
Réponse effectif	62 élèves	67	61	47
$U_g = U_{\text{récepteur}}$ Loi U correcte	86 %	64 %	57 %	13 %
$U = \text{Cte}$ Loi I	11 %	13 %	23 %	34 %
Sans réponse	2 %	10 %	16 %	30 %

Remarques : d'une colonne à l'autre, selon les lignes, l'évolution ne se fait pas toujours régulière :

- il y a progression régulière des sans réponse ou absence de représentation ;
- il y a progression plus ou moins régulière de l'utilisation des lois de l'intensité, les scientifiques les empruntant dans des proportions voisines quelque soit l'enseignement vécu ;

- il y a diminution de l'application de la loi physique, mais les non scientifiques ayant suivi la séquence ont des réponses beaucoup plus proches des élèves scientifiques ayant appris avec l'enseignement usuel que des autres élèves non scientifiques.

Le progrès paraît supérieur dans l'organisation et le niveau de la connaissance du concept, dans le cadre limité du circuit le plus connu des élèves, pour tous les élèves ayant appris avec la séquence. L'efficacité de la séquence est, une fois de plus, supérieure avec les élèves ayant un projet scientifique.

2 - d – D.d.p. aux bornes des éléments d'un circuit à deux récepteurs

Tableau de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en série

Question V₂

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement Réponse effectif	Séquence 32 élèves	Habituel 33	Séquence 32	Habituel 23
Loi U	63 %	61 %	3 %	30 %
Loi I	9 %	0 %	6 %	22 %
Sans réponse	3 %	18 %	31 %	35 %

Tableau de la d.d.p. aux bornes de dipôles montés en dérivation

Question V₂

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement Réponse effectif	Séquence 30 élèves	Habituel 34	Séquence 29	Habituel 24
Lois U	77 %	29 %	28 %	12 %
Loi U correcte	67 %	23 %	17 %	4 %
Loi I	7 %	32 %	14 %	13 %
Sans réponse	10 %	15 %	24 %	42 %

On peut remarquer, comme à la question précédente, l'évolution d'une colonne à l'autre :

- il y a aussi progression régulière des « sans réponse » correspondant à une absence de représentation ;
- il y a diminution de l'utilisation de la loi physique, mais les non scientifiques ayant suivi la séquence fournissent des réponses plus proches des élèves scientifiques ayant reçu l'enseignement usuel, que des élèves non scientifiques de ce même enseignement.

Ces tableaux, ne tenant pas toujours compte de l'exactitude de la réponse fournie, parfois seulement de la nature de la loi mise en oeuvre, on aurait tendance à écrire que les scientifiques de la séquence gèrent mieux le montage dérivation et les autres populations, mieux le montage en série. En fait, le montage en série est le plus souvent géré, en dehors de la séquence, en considérant le débit du générateur constant ce qui évite tout détour mathématique.

2 – e - Réinvestissement des lois de la d.d.p. dans le montage mixte

Nous allons tout d'abord regarder quels élèves ont cherché à fournir une réponse, puis observer la nature des réponses recueillies (tableaux, haut p. 58).

Le premier tableau fait apparaître un comportement différent des élèves scientifiques de la séquence : ils sont deux fois plus nombreux que tous les autres élèves à chercher à fournir une réponse sur le montage mixte.

On peut aussi noter que tous les élèves de la séquence cherchent à dire tout ce qu'ils savent : ils sont plus nombreux à fournir des réponses incomplètes.

Tableau des élèves ayant fourni une réponse
Question V₃

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement	Séquence	Habituel	Séquence	Habituel
Réponse effectif	62 élèves	67	61	47
Complète	63 %	33 %	28 %	32 %
Incomplète	10 %	3 %	11 %	2 %
Sans	27 %	64 %	61 %	66 %

**Tableau des réponses numériques complètes aux questions portant sur la d.d.p.
aux bornes des éléments d'un circuit mixte**
Question V₃

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement	Séquence	Habituel	Séquence	Habituel
Réponse effectif	39 réponses	22	17	15
Lois d.d.p. correcte	23 %	0	0	0
Lois d.d.p. « collège »	10 %	0	35 %	0
Mélange				
Loi U + Loi Intensité	18 %	9 %	12 %	13 %
Lois de l'intensité	5 %	0	6 %	7 %
U = constante	23 %	27 %	24 %	7 %
Autres	21 %	64 %	24 %	73 %
Remarque : 1 élève représente	2,5 %	4,5 %	6 %	7 %

On peut remarquer qu'aucun élève de l'enseignement habituel ne s'est servi uniquement des propriétés de la d.d.p. pour répondre à des questions sur la d.d.p. aux bornes de dipôles montés suivant un schéma mixte. En majorité ils ont au mieux utilisé :

- un raisonnement considérant la d.d.p. égale aux bornes de dipôles, pour 17 % d'entre eux ;
- un mélange des lois (11%) ;
- majoritairement un raisonnement plus confus, souvent piloté par un générateur à débit constant (68 %).

Les élèves de la séquence ont privilégié :

- un raisonnement à base de lois de la d.d.p. pour 34 % d'entre eux ;
- puis le raisonnement à d.d.p. constante (22 %) ;
- enfin on arrive aux confusions de lois (phase d'apprentissage du concept) et aux réponses confuses.

Classement des réponses les plus fréquentes (% des réponses recueillies) :

Réponse enseignement	Lois de la d.d.p.	Mélange de lois Intensité + d.d.p.	U = Cte	Autres
Séquence / 56	34 %	16 %	22 %	21,5 %
Autre / 37	0	11 %	17 %	68 %

Non seulement les élèves de la séquence sont plus nombreux à fournir une réponse, mais celle-ci est le reflet de la représentation d'un concept bien différencié dans le tiers des réponses et ayant des propriétés propres pour la moitié.

Certaines réponses semblent correspondre à **des étapes d'apprentissage** des propriétés du concept, non établies dans le déroulement de la séquence, mais liées au passé de l'élève en temps qu'apprenant de la physique :

- **Les lois apprises au collège** qui correspondent au cas particulier d'un circuit dont les dipôles récepteurs sont identiques. Les élèves qui les empruntent le plus pour fournir une réponse appartiennent curieusement à la séquence, qui semblerait avoir réactivé cette « mémoire collège ». Ce cas particulier est peut-être une étape à prendre en compte avant d'observer ses limites et d'établir une loi plus générale avec des dipôles différents. Elles constituent 22 % des réponses des élèves de la séquence.

- Comme certains élèves raisonnent à courant constant, on découvre que d'autres raisonnent à **d.d.p. constante** aux bornes des dipôles (avec pour le fil une d.d.p. nulle ou égale à celle des autres dipôles). Cette représentation simple, efficace sur le circuit ne comportant que des dérivation, qui dispense de toute autre loi ou propriété pour prévoir, apparaît dans le quart des réponses des élèves, à l'exception des non scientifiques de l'enseignement habituel. Elle représente une étape construite par l'élève, qu'il est bon pour l'enseignant de connaître, pour l'aider à en mesurer les limites et l'inviter à aller plus loin.

Certaines réponses correspondent à un état de confusion, fruit de la déstabilisation générée par l'enseignement : l'élève a bien compris que I et U sont deux concepts distincts, il ne se les représente pas encore avec assez de précision et parfois, applique à l'un les propriétés de l'autre.

La confusion la plus totale règne au niveau des « autres réponses » qui peuvent correspondre à des réponses n'utilisant aucune loi connue de l'un des deux concepts, et prévoient le plus souvent des valeurs inattendues, inexplicables, obéissant à des relations éloignées de toute loi physique. Le maximum de confusion se trouve dans les réponses des élèves ayant suivi un enseignement usuel (68 %) dont peu ont franchi le cap de ne répondre qu'en n'utilisant des propriétés de la d.d.p., fussent-elles incorrectes ou incomplètes.

Conclusion en lien avec les hypothèses mises en oeuvre

Le plus grand nombre de réponses, la meilleure qualité des réponses, le réinvestissement des lois « collège », l'élaboration des lois, des réponses moins confuses sembleraient indiquer un **impact réel des méthodes d'apprentissage de la séquence**. Tous les élèves concernés ont progressé, même plus que les élèves scientifiques de l'enseignement usuel où la plus forte proportion de réponses mêle les propriétés des deux concepts U et I.

Toutefois la connaissance de la d.d.p., comparée à celle de l'intensité, reste limitée à une minorité d'élèves, la majorité des élèves de la séquence se trouvant en chemin.

3 - Concept de conducteur-résistant

Son étude n'apparaît que de façon implicite à la lecture du programme de la classe de seconde. Par exemple, lorsque, dans les compétences exigibles, on attend que l'élève sache :

- « *loi universelle de conservation de la charge* »,

cela peut sous entendre que l'on sache que l'effet de ce dipôle ne se limite pas à l'intérieur de celui-ci, ou en aval, mais s'étend à l'ensemble du circuit, y compris l'intérieur du générateur...

- « *loi d'Ohm pour un conducteur ohmique* »,

on peut se contenter d'applications numériques, ou au contraire réfléchir, à d.d.p. constante à l'influence de ce dipôle sur le débit, lorsqu'il est ajouté ou supprimé d'un montage en série ou en dérivation, idée confortée par :

- « *rôle du rhéostat* » et « *loi d'association des résistances* » qui peut être abordée de façon purement mathématique, mais aussi s'illustrer qualitativement...

Cet implicite du programme officiel, la séquence a jugé bon de l'étudier. Nous allons rechercher :

- si l'effet de la présence du conducteur-résistant s'étend à l'ensemble du circuit, conformément à la loi de conservation de la charge ;
- la nature de cet effet lorsqu'on l'ajoute ou le retire d'un montage en série ou en dérivation, cette prévision pouvant découler, pour les élèves de l'enseignement habituel, de la mise en oeuvre de la loi d'Ohm et de la résistance équivalente.

3 – a – Conservation du débit le long d'un montage en série

Nous avons déjà indiqué (tableau p. 53) les progrès concernant la conservation du débit le long d'une boucle fermée, progrès observés chez 48 % des élèves ayant suivi la séquence et 10 % des élèves ayant suivi un autre enseignement.

Nous pouvons traduire les résultats reportés dans ce tableau en terme de conservation du débit pour des dipôles montés en série, sachant que :

- les raisonnements locaux et séquentiels introduisent des discontinuités du débit, alors que
- le raisonnement à courant constant comme le raisonnement systémique correspondent à une conservation du débit.

En fin de seconde, il se trouvait cette année là, **66 % des élèves ayant suivi l'enseignement de la séquence** pour respecter la conservation du débit traversant des dipôles montés en série et **28 % des élèves de l'enseignement habituel**.

Affirmer « *l'intensité est la même en tout point d'un circuit* » comme le faisait leur livre (Nathan, 2°), ne suffit pas. Seul un petit tiers des élèves de l'enseignement habituel, dont l'analyse reste majoritairement séquentielle, utilise cette propriété ainsi que les deux tiers des élèves de l'autre population. Que deviennent ces raisonnements pour les élèves qui se retrouvent en 1°S (questionnaire, Annexe VI. 5-14) ?

Tableau des raisonnements mis en oeuvre sur le circuit série

Question III, qualitative

Fin 1°S, Mai 2000

Raisonnement Enseignement / effectif	Séquentiel	A courant constant	correct
Séquence / 20 élèves	0	20 %	75 %
Habituel / 37 élèves	19 %	30 %	35 %

On observe qu'en réponse à cette question aucun élève de la séquence n'emprunte le raisonnement séquentiel alors qu'il y a près d'un cinquième de l'autre population. Le raisonnement à courant constant, ne correspond à aucune discontinuité.

Ce prérequis semble bien maîtrisé par les élèves ayant suivi la séquence. Il est une étape utile vers le raisonnement systémique.

3 – b - Effet d'une résistance sur le débit

Nous cherchons à savoir quel est, pour l'élève arrivé en fin de seconde, l'effet de l'ajout ou du retrait d'une résistance, en série ou en dérivation. Nous en avons déjà parlé pp. 20-22.

Sur le circuit série, les élèves ayant appris avec la séquence étaient deux fois plus nombreux en seconde, et le sont toujours en première à connaître l'effet de l'ajout d'une résistance en série : 75 % des élèves de la séquence et 35 % des autres ont conservé cet acquis un an après son enseignement.

Nous avons déjà évoqué **la nature des justifications rencontrées à la réponse correcte** : la loi d'Ohm ne permet de la justifier qu'à 13 % des élèves de la séquence et 31 % des autres. Les élèves de l'enseignement habituel affirmant plus qu'ils ne justifient, c'est dire que, proportionnellement, **les élèves de la séquence utilisent majoritairement une approche qualitative** pour justifier la réponse correcte. Lors de la dernière expérimentation il s'est trouvé jusqu'à :

- 80 % des réponses correctes reposant sur l'image du frein en série,
- 70 % sur l'image du chemin en dérivation, parmi les élèves de la séquence.

L'image du frein se retrouve, en fin de seconde, pour justifier la différence de débit dans deux branches dérivées : parmi les élèves prévoyant un partage inégal, la répartition correcte est présente à 75 % pour les élèves ayant suivi la séquence et à 37 % pour les autres, ce qui révèle une meilleure représentation de l'effet de ce dipôle sur la circulation.

En 1°S, **l'image du frein**, utilisée par 4 élèves de la séquence a été assez suggestive pour être aussi utilisée par 5 élèves n'en ayant entendu parler que par le chercheur lors de l'introduction à l'option sciences expérimentales en 1°S.

Quelle est la nature des justifications aux autres réponses ?

- Pour le **raisonnement à courant constant**, ce sont des affirmations qui décrivent la représentation d'un générateur débitant toujours la même intensité et d'un circuit parcouru par un débit invariable, le même partout, toujours.

- Pour le **raisonnement séquentiel**, il y a affirmation d'un générateur débitant toujours la même intensité et de l'effet de la résistance sur le débit, seulement après la traversée de celle-ci car elle diminue, retient, absorbe de l'intensité.

La **loi d'Ohm** ne leur est d'aucune utilité. Leur conception du générateur est dans les deux cas à débit constant. Par contre, le rôle de la résistance est différente :

- l'élève au raisonnement séquentiel a bien acquis l'influence d'une résistance sur le débit des électrons mais uniquement après la résistance, alors que
- l'élève qui raisonne à courant constant a acquis l'unicité du débit sur l'ensemble d'une boucle, mais n'attribue aucun rôle à la résistance sur ce débit.

On voit que ces deux approches **ne prennent pas en compte le lien entre le dipôle R et la circulation**. Chaque fois l'élève a assimilé une propriété :

- soit de la circulation, mais pas de l'influence de R sur le débit : il raisonne à courant constant ;
- soit du dipôle R, mais pas de la circulation : il utilise un raisonnement séquentiel (ce raisonnement est absent des réponses d'élèves de la séquence, en fin de 1^oS).

4 - Concept de circuit : interaction entre le circuit et le générateur

Nous avons parlé de la représentation du générateur à débit constant (pp.16-18), de sa lente évolution au cours de la séquence. Cette évolution peut se concevoir en lien avec l'unicité du débit et l'effet de la résistance sur celui-ci, sachant que dans le même temps des élèves mesurent l'intérêt d'un raisonnement à courant constant (pp. 27-29).

Nous pouvons compléter le tableau des réponses aux questions obtenues en fin de seconde (p.28), analysées sous l'angle du débit du générateur, par les réponses des élèves de l'enseignement habituel :

Tableau des réponses avec un générateur dont le débit varie

(fin de seconde, Mai 1999)

Question Circuit Enseignement	Question II qualitative simple	Question III qualitative série	Question III qualitative dérivation	Question IV qualitative mixte	Question V ₃ numérique mixte
Effectif	123 élèves	59 élèves	64 élèves	123 élèves	123 élèves
Séquence				110 réponses	50 réponses
	74 %	46 %	42 %	38 % él. 43 % rép.	11 % él. 26 % rép.
Effectif	113 élèves	57 élèves	56 élèves	113 élèves	113 élèves
Habituel				81 réponses	32 réponses
	21 %	3 %	21 %	10 % él. 14 % rép.	4 % él. 16 % rép.

Lors de cet essai, le courant traversant le générateur varie, lorsque la valeur de la résistance d'un circuit simple évolue, pour 74 % des élèves de la séquence et 21 % des autres.

Observons ce que deviennent ces représentations en fin de 1^oS :

Tableau des élèves ayant adapté le débit du générateur au circuit

réponses qualitatives - fin 1^oS, Mai 2000

Question Enseignement	II simple	III série	III dérivation	IV (R1 + R2) // R3	IV (R1 // R2) + R3
Séquence 39 élèves	85 %	75 %	58 %	35 %	79 %
Habituel 72 élèves	38 %	35 %	23 %	13 %	17 %

Tableau de la fréquence des réponses numériques où il existe une interaction entre le générateur et le circuit

Question	V ₂ série	V ₂ dérivation	V ₃ mixte
Enseignement			
Séquence	6 / 19 élèves 32 %	8 / 20 40 %	11 / 39 28 %
Habituel	1 / 35 élèves 3 %	6 / 37 16 %	8 / 72 11 %

En fin de 1^oS, les élèves ayant suivi la séquence fournissent de meilleures réponses aux questions qualitatives. Pour les réponses chiffrées, les outils à employer ne leur sont pas assez familiers, telle la résistance équivalente, ce qui les conduit à émettre (plus ou moins explicitement) des hypothèses fausses, comme la constance du débit de la branche principale.

Plus des trois quarts de ces élèves fournissent une réponse correcte sur le circuit simple ou en série, ils sont moins familiers du montage en dérivation ou mixte.

Dans tous les cas ils sont au moins deux fois plus nombreux à imaginer une interaction entre le générateur et son circuit que ceux ayant suivi un enseignement habituel : on peut noter là un effet conjugué des hypothèses.

Lors du questionnaire passé en Mai 2000 aux élèves de diverses académies on a pu également noter l'importance du nombre de réponses où l'élève conserve un débit constant au générateur, nombre que l'on aurait envie de comparer au nombre de réponses aux questions qualitatives. Sur le circuit série, voici le tableau de la fréquence des réponses considérant le générateur à débit constant :

Tableau de la fréquence des réponses avec Ig constant sur le circuit série

Fin de seconde, Mai 2000

Réponse	qualitative		numérique	
Rapporté au nombre total	d'élèves	de réponses	d'élèves	de réponses
Séquence	57 / 145 39 %	57 / 135 42 %	19 / 75 25 %	19 / 61 31 %
Ens. habituel	46 / 68 68 %	46 / 60 77 %	8 / 53 15 %	8 / 10 80 %

Avec 80 % d'absence de réponse numérique dans l'enseignement habituel, la lecture de ce tableau pourrait s'en trouver faussée, c'est pourquoi il est intéressant de se rapporter au nombre total de réponses.

Alors il apparaît environ (en raison du faible effectif) deux fois plus de générateur à débit constant dans l'enseignement habituel, que la question soit qualitative ou numérique.

En Mai 1999, en fin de seconde on avait également observé les élèves dont la représentation du générateur était correcte, à la question V₃ (numérique, circuit mixte) en fonction de la section et de l'enseignement suivi :

Tableau des fréquences de représentation correcte du générateur

Fin de seconde, Mai 1999

Projet	Scientifique	Scientifique	Non scientifique	Non scientifique
Enseignement	Séquence	Habituel	Séquence	Habituel
Réponse effectif	62 élèves	67	61	47
U _g = Cte I _g varie	32,2 %	1,5 %	9,8 %	2,1 %
Sans réponse	11,3 %	23,9 %	34,4 %	55,3 %

Ainsi, à chaque essai, on observe **qu'ils raisonnent mieux qu'ils ne calculent** et que les élèves de la séquence, sont sensiblement plus nombreux à imaginer une interaction entre le générateur et le circuit. Sans doute est-ce un effet conjugué des hypothèses, en particulier du travail qualitatif, illustrant l'interaction d'un système siège d'échanges énergétiques, avec la chaîne de vélo.

La mise en oeuvre de cet ensemble d'hypothèses semble avoir permis à un plus grand nombre d'élèves de délaisser la représentation tenace du générateur à débit constant, pour accéder au concept d'interaction.

Lors de son mémoire professionnel « Quel enseignement en électricité pour une classe de seconde ? » L.Jourdes (1999, p. 22) après des observations similaires, laisse penser dans sa conclusion que chaque enseignement ne conduit pas à un savoir de même nature, idée que nous tenons à développer :

5 – Nature de la connaissance à laquelle chacun de ces enseignements donne accès

En reprenant l'analyse de l'évolution du progrès cognitif des élèves appartenant à différentes populations de seconde nous remarquons, comme L.Jourdes l'avait observé à plus petite échelle, que lorsque :

- le **circuit se complexifie**, la capacité à répondre s'émousse plus vite chez les élèves scientifiques ayant suivi l'enseignement habituel que chez les autres élèves scientifiques ;
- **l'habillage de la question est moins familier** à l'élève (si on remplace une résistance par une lampe, un interrupteur ouvert par un fusible, une lampe grillée ou dévissée...), si la situation est différente de celle où l'enseignement s'est fait, chez les bons élèves de l'enseignement traditionnel, le taux de réponses et le taux de réponses correctes chutent, alors que les élèves de la séquence cherchent à réinvestir les lois, quitte à ne fournir que des réponses partielles, telles $U_g = Cte$ ou $U_{fil} = 0$.

L'enseignement traditionnel, par le rythme de sa progression, se comporte comme s'il suffisait à l'élève d'avoir vu ou entendu parler une fois d'un concept et de ses propriétés pour être en mesure de l'utiliser pour répondre à une question. Aussi l'élève avoue qu'il n'y comprend rien, et s'il s'est donné mission de réussir, se met à la recherche de recettes miracles ou de formules magiques. Cela le conduit soit à généraliser ce qu'il a cru apercevoir telle « *l'intensité est la même partout* », surtout si cela lui permet une réponse rapide et parfois exacte, soit à rester sans réponse « *je ne sais pas faire* ». Ignorer la nature spécifique de la connaissance scientifique et la difficulté d'y accéder semble aboutir à la mise en place d'un **savoir de mémoire, de raisonnements mécaniques**, ou à une situation correspond une réponse. L'enseignement habituel ne laisse pas le temps à l'élève d'analyser les situations, leurs points communs et leurs différences, de jouer avec les paramètres et d'en mesurer l'influence, en un mot de se construire les concepts, de tester leur pouvoir explicatif et prédictif. Le savoir acquis paraît ne pouvoir fonctionner, chez les bons élèves, que dans les situations où il a été présenté.

L'enseignement de la séquence, par des réinvestissements utilisant des composants différents, ou des montages variés, essaie d'aider l'élève à **décontextualiser** la connaissance et à se l'approprier : l'étude de circuits dans lesquels on ajoute ou retire une résistance ou une ampoule, en série ou en dérivation, où la valeur de la résistance varie entraîne l'élève à se poser des questions, à mettre en oeuvre ce qu'il croit savoir, à en mesurer la portée. Ce travail complète le travail qualitatif qui tente de donner un contenu à chacun des concepts.

L'observation des réponses en fin de 1^{re}S montre un effet dans la durée de ces deux modes d'accès au savoir : les élèves de la séquence paraissent plus nombreux à pouvoir raisonner sur un circuit et prévoir ce qui se passe si un paramètre change, ils ont été « *entraînés à réfléchir et à mieux se représenter le fonctionnement d'un circuit.* » (L.Jourdes)

V – Conclusion de la prise de repères externes

La mise en parallèle des réponses fournies par les élèves ayant appris avec la séquence et celles d'élèves ayant suivi un enseignement habituel, lors de différents essais, recueillies à une distance plus ou moins grande de l'apprentissage, a montré :

1 – que les élèves de la séquence **sont plus nombreux à fournir une réponse**, quelque soit le concept testé et le niveau de connaissance requis, même le plus élémentaire, ce qui paraît révélateur d'un plus grand engagement dans la tâche d'apprentissage ;

2 – l'intérêt d'enseigner les « évidences », telles

- ce que le physicien nomme circuit et ce qu'il nomme circulation,
- l'effet de l'ouverture du circuit sur la circulation,
- l'effet d'une résistance sur l'ensemble de la circulation et en particulier sur le débit qui traverse le générateur.

Faute d'enseignement dans ces domaines, l'élève conserve ses représentations ;

3 – un progrès cognitif portant sur les trois concepts, avec un degré d'acquisition qui paraît supérieur pour les élèves scientifiques de la séquence, suivis par les non scientifiques de la séquence dont le niveau voisine celui des scientifiques de l'enseignement habituel, loin devant les indifférenciés de l'enseignement habituel. Il se manifeste à la fois par le taux des réponses correctes et un meilleur réinvestissement sur les circuits à plusieurs récepteurs ;

4 – des justifications de nature différente, révélatrices de l'existence d'une représentation des concepts et d'un début de compréhension de la loi d'Ohm, résumé saisissant au riche contenu le plus souvent à peine entrevu par les élèves, derrière la relation mathématique.

Par ailleurs, on a pu mesurer :

- 1 - l'impact des lois apprises au collège** sur la d.d.p ou l'intensité, dans des cas particuliers, qui se retrouvent généralisées avec une fréquence voisine, tous enseignements confondus, et qui sont peut-être une étape de l'apprentissage, telle la représentation de la répartition du flux à un nœud qui commence le plus souvent par être équitable ?
- 2 - l'apparition de lois parasites**, soit :
 - issues de confusions, révélatrices d'un stade de l'apprentissage ($I_{\text{fil}} = 0$),
 - issues d'une généralisation, parfois efficace, d'une propriété remarquée sur le circuit simple, telle l'attribution d'une d.d.p. à un dipôle $U_{\text{dipôle}} = Cte$
- 3 - mais aussi l'intérêt de sections différenciées** : ce sont dans les classes de seconde constituées par des élèves ayant fait le choix d'études scientifiques que nous avons à la fois trouvé :
 - un taux de réponse supérieur, qui est en partie le reflet de l'investissement de l'élève dans la tâche d'apprentissage, et en partie la manifestation que la question posée a un sens pour lui ;
 - et les réponses les plus proches de celles du physicien, quel que soit le circuit ou le concept ;
- 4** ainsi que **l'opportunité de la remédiation** qu'offrait l'option sciences expérimentales en 1^{er}S...

La séquence est apparue d'autant plus efficace qu'elle s'adresse à des élèves ayant manifesté un intérêt pour les sciences : il semblerait qu'il y ait tout intérêt à différencier les populations, et sans doute également les contenus des programmes.

Résumé de l'analyse a posteriori

A – Retour sur les hypothèses

I / Recherche d'effets spécifiques

Tout en se souvenant que nos hypothèses sont interdépendantes, nous avons recherché quelques effets plus particulièrement en lien avec l'une d'elles, par exemple :

a – de la maîtrise des prérequis qui conduit à tenter d'homogénéiser la base de départ nous attendions :

- **une plus grande implication des élèves dans la tâche d'apprentissage.** Elle a pu être constatée par les expérimentateurs et confirmée lors de l'évaluation de la séquence par les élèves ;

- **une diminution de la dispersion des représentations**, accompagnée d'une **amélioration du niveau de maîtrise**. Nous avons pu l'observer tant sur le concept d'intensité que sur celui de résistance (nous ne parlons pas de la d.d.p. qui n'avait pas de représentation au départ).

b – de l'approche énergétique nous attendions une **diminution du taux**

- de **représentations énergétiques**, et donc
- de **raisonnements avec discontinuités du débit**

ainsi que l'**apparition de représentations du concept de d.d.p.**

Nos observations ont répondu à ces attentes, mais ces progrès cognitifs sont sans doute la conséquence de la mise en place simultanée des autres hypothèses.

c – de l'approche qualitative nous espérions une **prise de sens** par formation de représentations. Nous avons observé, particulièrement chez les élèves du chercheur, l'apparition de justifications qualitatives à l'aide des images ou analogies mises en œuvre au cours de l'apprentissage. Nous les avons même retrouvées en fin de 1^oS. Elles ont participé, par exemple, à la représentation du **conducteur-résistant** (chemin ou frein) ou à celle d'une **interaction** possible entre le **générateur** et le **circuit**, c'est-à-dire au progrès cognitif.

II / Recherches d'effets en lien avec le bouquet d'hypothèses

a – Recherche d'un progrès cognitif

De la mise en œuvre des hypothèses nous attendions un **progrès cognitif**. Il s'est manifesté par l'appropriation d'un vocabulaire spécifique, qualitatif et imagé pour chaque concept. Il permet aux élèves de fournir des explications ayant du sens :

- la résistance est perçue comme un frein au passage des électrons, ou mieux au débit des électrons circulant dans le circuit ;
- ce circuit peut être illustré avec l'analogie de la chaîne de vélo et être décrit comme un système en interaction ;
- la différence de potentiel existant aux bornes du générateur se répartit entre les récepteurs en série, tandis que des dipôles en dérivation possèdent la même.

Des élèves possèdent maintenant une représentation de ces concepts, en lien avec celle de la circulation. Ils ont peu à peu attribué des propriétés aux concepts qui les relient les uns aux autres : tout paraît en place pour donner sens à la loi d'Ohm.

Ce travail de construction de représentations des concepts par les élèves les conduit à formuler de **nouvelles prévisions**. Avant enseignement ils empruntaient, en majorité, le raisonnement séquentiel. Maintenant nous assistons à une représentation de la continuité du débit le long d'une branche, de part et d'autre d'un dipôle, de part et d'autre d'un nœud. Ces représentations qualitatives conduisent à des raisonnements **systemiques** en réponse aux questions **qualitatives**, mais à **courant constant** en réponse à des questions **numériques** où le recours au générateur à débit constant facilite la recherche d'une réponse : nos élèves raisonnent mieux qu'ils ne calculent. Il reste à concevoir des étapes facilitant l'accès des élèves aux réponses numériques.

Une majorité d'élèves met en œuvre les lois concernant la **d.d.p** pour répondre aux questions sur le circuit simple et celui avec dipôles en dérivation. Pour les autres circuits, le **générateur à débit constant** constitue un **réel obstacle** qui nous a permis d'observer **des étapes d'apprentissage** du concept, tels :

- le partage équitable de la d.d.p. du générateur entre tous les dipôles ;
- la d.d.p. aux bornes d'un dipôle, propriété spécifique de ce dipôle : même résistance, même d.d.p. ;
- le raisonnement à d.d.p. constante.

b – Réactions des partenaires de l'apprentissage

Il en coûte aux élèves et aux enseignants de changer de contrat didactique. Mais de l'expérimentation du notre, il ressort :

- que **l'élève** a bénéficié d'un enseignement personnalisé qui a permis à chacun de progresser à partir de son état de connaissance. Nous avons cherché à éveiller sa curiosité, puis les analogies et les modèles qualitatifs l'ont aidé à se représenter les phénomènes : il a eu l'impression et le plaisir de comprendre ;
- que **l'enseignant** a eu l'opportunité de découvrir (parfois avec surprise) les raisonnements de ses élèves et a pu tester si nos hypothèses d'apprentissage les aidaient à se rapprocher des modèles du physicien.

III / Dans quelle mesure les hypothèses ont-elles été mises en œuvre ?

En l'absence de formation particulière des enseignants avant l'expérimentation de la séquence nous pouvons seulement être certains de la mise en œuvre des hypothèses qui participaient au déroulement de la séquence :

- l'approche énergétique ;
- l'approche indépendante des concepts ;
- la maîtrise des premiers prérequis : les concepts de circuit et de circulation.

Nos observations tendraient à montrer qu'une formation des enseignants les aiderait à mieux exploiter les hypothèses, dont l'approche qualitative, mais aussi que du temps est nécessaire pour en maîtriser l'usage.

B – Prise de repères externes

La prise de repères externes montre pour chacun des concepts un plus grand nombre de réponses, une meilleure qualité des réponses et des justifications chez les élèves de la séquence : sa population non scientifique fournit des prévisions équivalentes à celles des élèves scientifiques de l'enseignement habituel. Ces observations sembleraient indiquer un impact réel des méthodes d'apprentissage de la séquence.

Cette impression est confortée par la **nature différente de la connaissance** à laquelle chacun de ces enseignements donne accès :

- **l'enseignement habituel** conduirait l'élève à un **savoir de mémoire**, des **raisonnements mécaniques** ce qui expliquerait que l'élève soit déstabilisé dès que la question n'est plus habituelle, que le circuit évolue...
- **la séquence**, en multipliant les réinvestissements, aiderait l'élève à **décontextualiser** la connaissance et à se l'approprier : il a été entraîné à réfléchir et à **mieux se représenter** le fonctionnement d'un circuit.

En résumé, les effets attendus se sont effectivement produits, pas toujours avec l'ampleur espérée. Nous voyons au moins deux raisons :

- l'absence de formation des enseignants et
- l'absence de réflexion sur le gap que représente pour l'élève le passage au formalisme.

Cinquième partie

CONCLUSIONS

CONCLUSION

Nous avons cherché, par des questionnaires et des entretiens, à préciser ce que « sait l'élève qui arrive en classe de seconde ». Nous avons approfondi notre connaissance des représentations pour mieux les intégrer à l'activité d'apprentissage et aux stratégies d'acquisition d'un savoir. L'analyse des programmes et des manuels nous a fait découvrir la part d'implicite de l'enseignement habituel. En parallèle nous avons mené une réflexion sur les rôles qui pouvaient être attribués au maître, à l'élève et à l'expérience. Une autre réflexion a porté sur la nature de la connaissance scientifique et les moyens d'y accéder. Toutes ces analyses nous ont conduit à concevoir et expérimenter une séquence, dont nous avons tiré quelques enseignements.

I - Des éléments de conclusion

1 – Etapes d'apprentissages

Le recueil de toutes les traces écrites par les élèves en classe a permis de suivre l'évolution personnelle de leurs représentations du fonctionnement du circuit et de leur appropriation progressive des concepts :

1 – a – Circulation et intensité

J.L.Closset avait émis l'hypothèse d'une hiérarchie cognitive des raisonnements fondée sur le nombre de discontinuités du débit présentes dans chacun d'eux. L'évolution de l'élève dans sa compréhension de la circulation des porteurs de charge suivait-elle cette progression cognitive ? Nous avons pu observer la représentation de la circulation à différents stades de l'apprentissage : le raisonnement mis en oeuvre sur le circuit simple (ou série), puis sur la branche principale et sur la branche dérivée (dont la résistance varie) d'un circuit mixte.

En comparant le raisonnement employé sur le circuit simple puis sur la branche principale d'un circuit mixte, il apparaît que le raisonnement sur le circuit simple se transpose et évolue souvent par étapes :

- partant d'un raisonnement local ou séquentiel, l'évolution passe majoritairement par le raisonnement à courant constant (sur la branche principale) avant d'aboutir au raisonnement systémique ;
- partant d'un raisonnement à courant constant, quelques élèves retournent au raisonnement séquentiel, mais la majorité des élèves passent au raisonnement systémique.

En comparant le raisonnement sur le circuit simple avec le raisonnement sur la branche dérivée d'un circuit mixte, on observe que celle-ci se trouve analysée par les élèves comme un circuit simple. Quelque soit le raisonnement de départ, l'évolution est rapide vers le raisonnement systémique :

- partant d'un raisonnement local (quelques uns font un détour par le raisonnement séquentiel, ou à courant constant) ou séquentiel, la majorité des élèves passent directement au raisonnement systémique ;
- partant d'un raisonnement à courant constant, ils passent tous au raisonnement systémique.

Ainsi le raisonnement correct semble plus accessible au niveau de la branche dérivée qu'au niveau de la branche principale. L'interaction entre le circuit principal et ce qui se passe dans une branche a paru plus difficile d'accès, a nécessité plus d'étapes, en particulier le détour par le raisonnement à courant constant sur la branche principale.

Ces observations, faites au sein de populations de Brive et de Grenoble, tendraient à confirmer l'hypothèse de J.L.Closset selon laquelle le raisonnement local serait le plus facile à délaisser et le générateur à débit constant le véritable obstacle. Nous avons pour notre part observé l'évolution du raisonnement :

local → séquentiel → à courant constant → systémique

L'élève passe rarement par toutes les étapes, s'y attarde plus ou moins et nous n'avons pas conduit tous les élèves au raisonnement correct, en particulier sur la branche principale. Cette hiérarchie semble décrire des étapes de l'apprentissage du concept d'intensité, étapes non enseignées, mais étapes par lesquelles le raisonnement qui n'évolue que par petits pas, passe, s'attarde parfois quand il n'effectue pas un retour en arrière lorsque le circuit se complexifie.

A la lecture de ces résultats il est permis de se demander si nos observations ne seraient pas en lien avec notre conduite des démarches d'apprentissage. A cette question, nous pouvons fournir quelques éléments de réponse :

- ces étapes correspondent à une hiérarchie cognitive, décrite par J.L.Closset dans ses travaux : il rencontrait plus de raisonnement local chez les élèves les plus jeunes, puis le raisonnement séquentiel chez des élèves plus âgés, ce qui l'a conduit à émettre cette hypothèse ;
- ces différents raisonnements se rencontrent chez les élèves de l'enseignement habituel (mais ils ne laissent pas assez de traces pour effectuer des suivis) ;
- ces raisonnements sont présents en fin d'enseignement.

Toutefois le chemin d'apprentissage du concept d'intensité mériterait d'être confirmé par de nouvelles recherches. Il pourrait également se trouver analysé à partir de circuits mixtes. Sur ces circuits nous avons observé une diversité de représentations en fonction du regard plus ou moins étendu aux différentes portions du circuit que la question amène à prendre en compte. Le circuit mixte peut constituer un lieu d'observation des représentations en fonction d'une difficulté, des questions posées, ce qui serait un autre moyen de préciser les chemins d'apprentissage.

1 – b – Différence de potentiel

Les réponses fournies par les élèves aux questions portant sur des montages mixtes nous ont conduit à prendre en compte des représentations inattendues. Nous avons rencontré :

U = constante : si cette relation ne s'applique qu'aux dipôles et se trouve associée à une différence de potentiel nulle aux bornes des fils, elle permet à l'élève une prévision exacte sur le circuit simple et sur ceux comportant des dérivation reliées aux bornes du générateur. Il s'est trouvé une formulation voisine au domaine de validité plus large :

« **la d.d.p. aux bornes de tous les récepteurs est la même** » qu'ils soient montés en série, en dérivation ou dans un montage mixte et quels qu'ils soient. Cette propriété permet une réponse rapide, correcte en dérivation, quels que soient les dipôles, en série si les dipôles sont identiques. Elle peut s'apparenter à cette autre relation :

$U_{\text{dipôle}} = U_{PN} / n$: cette relation associée à une différence de potentiel nulle aux bornes d'un fil permet à l'élève une réponse correcte sur le circuit simple et sur le circuit composé de dipôles identiques en série.

Les exercices habituels ne posant pas de question sur les fils, ces relations que les élèves se sont forgées leur permettent de fournir la réponse correcte aux questions habituelles portant sur le circuit simple et selon le cas sur le circuit série ou le circuit en dérivation. Elles sont le reflet d'**élèves en quête de recettes** pour réussir plutôt que d'élèves cherchant à comprendre. Ces réponses semblent provenir de la généralisation d'une propriété valable dans un domaine précis :

- la première et la seconde, adaptées aux dipôles montés en dérivation ;
- la deuxième et la troisième conviennent pour des dipôles identiques en série.

Une autre généralisation de la loi en série s'est trouvée sous la forme $U_{PN} = \sum U_{\text{dipôles}}$, loi apprise pour des dipôles en série, mais généralisée aux montages mixtes.

D'autre part nous avons pu constater que si une majorité d'élèves envisagent un partage différencié entre les dipôles montés en série, ils sont plus nombreux à envisager un partage égal sur le montage mixte.

Ces représentations ne seraient-elles pas des étapes non enseignées, qui constitueraient des passages facilitant l'apprentissage, rendant le gap accessible ? Ces réponses apparaissant quel que soit l'enseignement suivi, ne sont pas à relier à la démarche spécifique de la séquence.

1 – c – Conducteur-résistant

Nous avons observé une appropriation lente d'un vocabulaire représentant l'effet de ce dipôle sur la circulation. L'enseignement habituel l'ignore, ne le fait intervenir que comme facteur de proportionnalité entre U et I. Son aspect résistant, frein à la circulation apparaît en premier dans les justifications de prévisions d'élèves, puis vient son aspect conducteur, chemin pour les porteurs de charge. Les élèves utilisant ces images fournissent presque exclusivement des prévisions correctes. Il faut bien toute la durée de la séquence pour que l'élève

s'approprier ces images, mais une fois assimilées elles se trouvent largement employées à bon escient, ce qui contribue à justifier une approche qualitative de ce concept.

2 – Quelques aides pour l'accès aux concepts

L'évaluation interne de la séquence, confirmée par la prise de repères externes nous conduit à émettre l'hypothèse que nos choix d'apprentissage ont facilité l'accès aux différents concepts et les progrès cognitifs des élèves... et probablement des maîtres...

Nous avons tenté d'installer chez les élèves une **maîtrise des prérequis** qui nous a conduit à enseigner certains points implicites du programme habituel, tels le circuit fermé, la circulation, le circuit ouvert ou le fil. Nous avons pu constater que l'élève qui n'a pas reçu d'enseignement dans ces domaines conserve ses représentations anciennes.

Cette maîtrise, qui n'a souvent été que partielle, cherchait à homogénéiser la base de départ. On en attendait une plus grande **implication des élèves dans la tâche d'apprentissage** qui a pu être constatée par les expérimentateurs de la séquence, et confirmée lors de l'évaluation de la séquence par les élèves. On attendait également une amélioration du niveau de maîtrise qui a pu être observée, par exemple sur le concept d'intensité, accompagnée d'une diminution de la dispersion des représentations.

Nous avons constaté une sensibilité des élèves aux manifestations énergétiques du circuit. Nous avons tenu à **aborder**, dès le début, **les échanges d'énergie** ainsi que le rôle du fil en nous appuyant sur l'analogie de la chaîne de vélo. Nous en attendions une diminution du taux d'interprétations dites énergétiques. Nous avons pu constater un effondrement du nombre d'élèves au raisonnement séquentiel : ce raisonnement perdrait l'essentiel de sa raison d'être dès lors que l'ampoule ne consomme plus de charges. Nous l'avons vu céder la place au raisonnement à courant constant ou au raisonnement systémique.

Nous cherchions à donner du sens, à aider à la compréhension et donc à la représentation du circuit. Pour cela nous nous sommes appuyés sur une **approche qualitative et l'utilisation raisonnée** de diverses **images et analogies**. Elles nous ont aidé à clarifier notre propre représentation des concepts et à en parler autrement que par des relations mathématiques. Nous avons remplacé l'enseignement à partir de mesures par la confrontation avec une situation énigmatique faisant naître un questionnement, conduisant l'élève, avec l'aide du maître, à la conception et l'élaboration imagée de modèles. Les analogies se voulaient constituer une aide à la construction chez l'apprenant de représentations, les réinvestissements cherchaient à familiariser l'élève en vue d'une appropriation progressive. Nos observations semblent montrer que cette approche a pu aider les élèves à se représenter la continuité du débit, le double aspect du conducteur résistant, frein supplémentaire ajouté en série, chemin supplémentaire en dérivation. Elle a également permis à des élèves d'abandonner la représentation communément admise d'un générateur à débit constant pour envisager une interaction entre le générateur et le circuit, dernier et réel obstacle avant l'accès au raisonnement systémique du physicien.

En fait nous avons mis en oeuvre ce « **bouquet d'hypothèses** » en lien avec une démarche de test d'hypothèses qui modifie le contrat didactique. Chaque hypothèse a joué un rôle, en interaction avec les autres, il est difficile de mesurer la part de chacune. Notre évaluation semble montrer que, même avec des enseignants sans formation spécifique, même avec des élèves aux projets divers, cet enseignement permettrait d'importants progrès cognitifs. Ce « bouquet » pourrait bien contribuer à la construction d'un savoir durable et d'une nature différente.

3 – Un savoir d'une nature différente

Nous avons montré que l'enseignement transmissif habituel conduit à un **savoir de mémoire** qui vient se greffer sur les représentations. Les connaissances de l'élève se résument à **des formules, vides de sens**, qu'il utilise à plus ou moins bon escient quand il ne les a pas oubliées : « *je ne me souviens plus* ». L'élève avoue qu'il **n'y comprend rien**. S'il s'est donné mission de réussir, il part à la recherche de **recettes miracles** ou de **formules magiques**. Son activité intellectuelle se résume à des **raisonnements mécaniques**, des blocs « question-réponse » qui permettent de fournir, sans réfléchir, une réponse rapide, avec un peu de chance exacte, aux questions les plus fréquentes de cet enseignement. Cet enseignement conduit l'élève à faire l'économie de

tout effort de pensée. Lorsque la situation est différente de celle où l'enseignement s'est fait, lorsque l'habillage de la question est moins familier, ou lorsque le circuit se complexifie, sa capacité à répondre s'émousse, le taux de réponses comme le taux de réponses correctes chutent. L'élève généralise au circuit mixte telle ou telle propriété du circuit simple, ou met en oeuvre ses représentations, le plus souvent reste sans réponse.

L'enseignement de la séquence, ni tout transmis ni tout construit, par des réinvestissements sur des montages variés avec des composants différents a voulu aider l'élève à **décontextualiser** la connaissance et à se l'approprier. La mise en oeuvre des hypothèses d'apprentissage avaient pour but l'élaboration par l'élève, avec l'appui du maître, d'un modèle limité, évolutif, du fonctionnement du circuit, au sein duquel chaque concept était introduit par nécessité et jouait un rôle. En fin de classe de première nous avons pu constater qu'une majorité d'élèves ayant suivi cet enseignement, sur le circuit simple, continuent à :

- différencier les concepts, en employant un vocabulaire approprié et en leur attribuant des propriétés distinctes ;
- fournir des réponses cohérentes, ne contenant qu'exceptionnellement une discontinuité du débit ;
- s'appuyer sur une loi pour fournir une réponse à une question de physique, en prenant en compte tous les éléments de la situation, c'est à dire avoir acquis une démarche d'analyse rigoureuse.

D'une façon générale, les réponses recueillies en fin de première ont montré que les élèves de la séquence apparaissaient plus nombreux à pouvoir raisonner sur un circuit et prévoir ce qui se passe si un paramètre change. Ils ont été entraînés à un **travail d'analyse** d'un circuit (plus qu'à la recherche d'une situation connue), non avec des formules, mais à **l'aide de représentations qualitatives** de son fonctionnement. Ce travail qualitatif est apparu performant. Il apparaît comme une étape nécessaire avant le passage au formalisme.

4 – Le vécu des partenaires de l'apprentissage

4 – a – L'élève

Nous le voulions **actif** et nous avons observé son **engagement dans la tâche d'apprentissage**. Le questionnaire préalable et son exploitation en groupe faisait que chaque élève arrivait à l'expérience avec une question personnelle. L'expérience était souvent pour lui source d'étonnement, faisait naître la curiosité et le plaisir de la découverte. Nous avons ressenti une appréciation positive du vécu en classe de la part des élèves, confirmée lors de l'évaluation de la séquence par les élèves. Nous pensons pouvoir relier l'adhésion de l'élève à la démarche de test d'hypothèse qui permet **d'individualiser l'enseignement** au sein du groupe classe, de répondre à la question que chaque élève se pose à son niveau. La réponse sera en lien avec sa capacité d'accéder à une connaissance nouvelle : **tous progressent à partir de là où ils sont**. C'est ainsi que nous avons pu constater qu'en moyenne des élèves de sections indifférenciées arrivaient à des connaissances voisines de celles des élèves scientifiques ayant suivi un enseignement habituel. Il n'y a pas d'élève laissé pour compte. Chacun y trouve du plaisir et il naît une sorte de complicité entre le « tuteur-médiateur » et chaque élève. Ceci est encore plus sensible au cours d'un entretien...

Cette démarche demande une bonne connaissance préalable des représentations des élèves, afin de poser les bonnes questions, celles qui feront apparaître une situation énigmatique, qui mettra l'élève en quête de sens, ce qui pourra le conduire au besoin du concept. Cette réflexion est à peine engagée, nous n'avons pu que l'effleurer à l'aide de travaux existants à ce jour. Elle reste à développer et à diversifier, en particulier pour la différence de potentiel.

4 – b – Le maître

Nous avons confié au maître la gestion du processus d'apprentissage, en interaction avec les stratégies de l'apprenant. Il ne délivre plus la connaissance comme sur un terrain vierge, ou comme s'il était bien préparé par l'enseignement du collège. Il doit inventer à tout instant une médiation entre la représentation de l'élève et l'expérience, entre la connaissance scientifique et l'ébauche de modèle acceptable par l'élève. C'est lui qui conduit l'élève à accepter de changer ses outils d'analyse, à délaisser ses croyances lorsqu'elles se révèlent incapables d'expliquer ou de prévoir le phénoménal et à les remplacer par d'autres dont il mesurera peu à peu la puissance.

Nous avons décrit pour notre stagiaire sa difficulté à entrer dans cette démarche. Elle s'est retrouvée dans les critiques formulées par les stagiaires de l'académie de Nantes qui ne comprenaient pas de devoir autant répéter, passer tant de temps sur une notion habituellement considérée comme acquise... Les collègues d'autres

académies, sensibilisées à la didactique, semblent y avoir mieux retrouvé leurs préoccupations. L'enseignant de la séquence était le gestionnaire de l'apprentissage en réponse à une demande de l'élève à qui il permet de progresser à partir de ses erreurs. Il se crée alors une sorte de partenariat au fil des interactions maître-élève qui n'a rien de comparable avec les relations mises en place dans un enseignement essentiellement transmissif. A cette occasion, nous avons pu mesurer la soif de comprendre de l'élève, le plaisir de voir confirmer son hypothèse ou de mieux se représenter un phénomène.

Il en coûte aux élèves comme aux enseignants de changer de contrat didactique. Nous avons vu que l'élève y trouve l'occasion d'un enseignement adapté à l'état de ses connaissances et s'implique dans l'apprentissage. L'enseignant ouvert y découvre les raisonnements de ses élèves, comprend l'origine de leurs erreurs, expérimente des moyens qui veulent aider l'élève à se rapprocher des modèles du physicien.

II – Perspectives

1 – Si c'était à refaire

1 – a – Nécessité de différencier les populations

Enseigner permet un approfondissement des relations didactiques, jamais achevé. Nous sommes conscients du chemin qui reste à parcourir pour élaborer des étapes acceptables permettant à l'élève une représentation qualitative du « circuit simple ». Nous avons pris conscience de la difficulté de la tâche, aggravée par certaines contraintes actuelles de l'enseignement.

Notre travail a maintes fois rencontré la différence de comportement entre les élèves ayant fait le choix d'un parcours scientifique et les autres. A chaque étape de la séquence les élèves des classes scientifiques se sont montrés plus engagés dans la tâche d'apprentissage : ils ont été plus nombreux à fournir une réponse, c'est à dire à s'être construit une représentation des concepts. Au fil du déroulement de la séquence, ces élèves utilisent un vocabulaire qui va en se précisant, ce qui indique une prise de sens de chaque concept. Ils sont plus nombreux à leur attribuer des propriétés spécifiques, montrant qu'ils apprennent à les différencier. Progressivement ces propriétés tendent à se rapprocher de celles du physicien.

Nous avons vu qu'une séance de travaux pratiques de trois heures, avec test d'hypothèses, en début de première scientifique, avec le chercheur, avait suffi pour permettre à ces élèves motivés d'accéder au raisonnement correct sur le circuit simple ou série, de réinvestir l'image du frein lors de l'évaluation en fin d'année.

Aujourd'hui nous avons à déplorer que dans notre académie il ne soit plus question que de tronc commun en seconde et de sections vraiment indifférenciées. Nous avons pour notre part constaté, en cohérence avec la pédagogie de la maîtrise, que lorsque les apprenants ont des centres d'intérêt proches, une même envie de comprendre, alors leurs progrès sont plus rapides, plus solides, pour plus d'élèves. C'est d'ailleurs ce qui se pratique en dehors de l'école de la république, dans le domaine sportif par exemple.

Nous avons mesuré l'intérêt de sections différenciées non seulement pour faire monter plus haut les meilleurs (n'en aurait-on plus besoin ?) mais aussi pour permettre à chacun d'aller le plus loin possible, dans le cadre d'un programme commun. Reste à savoir s'il convient qu'il reste le même selon le parcours plus ou moins long d'apprentissage envisagé. Il y aurait peut-être intérêt à différencier non seulement les populations, mais également les contenus des programmes ?

1 – b – Nécessité d'alléger les programmes

Cette nécessité apparaît si on veut permettre à l'élève une recherche de sens et non de recettes, mais le veut-on ? Actuellement, à tous les niveaux de l'enseignement de la physique dans le secondaire, il nous semble que les concepteurs de programmes ont oublié la nature spécifique et révolutionnaire pour l'esprit humain de la connaissance scientifique. Si l'enseignant veut finir le programme, il doit transmettre aussi clairement que possible, une connaissance concise, aussi vite qu'il le peut : il court d'un chapitre à l'autre. L'élève en a entendu parler une fois, très vite, ne l'a pas confronté à ses représentations, n'en a pas mesuré l'intérêt par des réinvestissements sur des situations différentes. Dans ce contexte ne nous étonnons pas : **l'élève n'y comprend rien !**

Pour ce qui est de l'enseignement de l'électricité, il a aujourd'hui disparu du programme de seconde. Par contre, l'actuel programme des classes de quatrième et de troisième de collège se fixe en électricité des objectifs dans un cadre horaire qui est celui de la séquence. L'étalement sur deux ans de son enseignement éviterait la lassitude observée et permettrait aux élèves de réinvestir la connaissance construite sur les circuits à un ou deux récepteurs la première année, dans des circuits plus complexes l'année suivante.

Laissera-t-on au collégien le temps pour imaginer le phénomène, de confronter ses prévisions à l'expérience, de se construire une représentation imagée des concepts du physicien ? A-t-il le droit pour un temps d'ignorer les mesures, les unités... ? L'élève aborderait ainsi l'électricité d'une manière plus vivante, plus attrayante, plus interactive que la simple lecture d'appareils de mesure ou la mise en oeuvre de formules mathématiques. Il arriverait peut-être en classe de seconde avec moins de préjugés défavorables. Il aurait une **idée dynamique** des travaux pratiques au lieu de la passive vérification de lois par des mesures. Il découvrirait peut-être **le plaisir de comprendre** des phénomènes physiques jusque là mystérieux, de se poser des questions et de tester les réponses possibles. Il apprendrait la rigueur de la démarche scientifique de réponse à une question.

1 – c – Nécessité d'espaces de liberté

Cette nécessité est liée aux exigences d'une pédagogie différenciée, si on souhaite que chacun puisse apprendre à son rythme et avec ses outils...

Nous avons pu mesurer combien, lorsqu'ils ont été possibles, les entretiens ont permis à l'élève de préciser ses représentations. Leur explicitation peut-être l'occasion pour l'élève de se trouver face aux limites ou aux contradictions de sa propre pensée. Ce fut souvent l'opportunité d'un enseignement très personnalisé.

L'option sciences expérimentales, par sa partie électronique, pouvait constituer une opportunité pour certains élèves d'entrevoir le fonctionnement du circuit électrique. Malgré le peu de temps consacré à des rappels d'électrocinétique (à partir de tests d'hypothèses, d'approches qualitatives illustrées d'analogies), l'effet a été tel que nous avons dû le prendre en compte lors de l'analyse des acquis en fin de première. Il se trouvait plus d'élèves, en fin de classe de première qu'en fin de seconde, à fournir les prévisions de la physique sur le circuit simple, ou à concevoir le circuit comme un système en interaction. Ces « rappels » ont permis une remédiation pour ces élèves.

De même que nous ne courons pas tous aussi vite, nous n'accédons pas tous à la connaissance par les mêmes chemins, ni à la même vitesse... et nous avons pu mesurer la lenteur de l'esprit humain. Il arrive un moment, chacun le sien, où l'élève a besoin d'une **étape intermédiaire** sous forme d'un mot, d'une image, d'une expérience... en fait, de temps pour se représenter et comprendre. Parmi les outils de remédiation, pourquoi ne pas utiliser aussi la simulation informatique qui aurait l'avantage de multiplier les réinvestissements possibles et de fournir une réponse plus rapide que l'expérience même ? Les élèves sont très friands de ce nouvel outil : si leur intérêt est stimulé et s'il leur permet d'apprendre en ayant l'impression de s'amuser, il faut en profiter...

1 – d – Nécessité d'une réelle formation des maîtres

Nous n'avons pas pu mettre en place une formation des enseignants de la séquence, ce qui nous a permis d'en mesurer toute la nécessité. Tout au long de nos analyses, reviennent comme des leitmotivs les différences entre les réponses des élèves du chercheur et les autres. Si tous les élèves de la séquence ont progressé, nous avons noté chez les élèves du chercheur des acquis supplémentaires permettant à un plus grand nombre de fournir la réponse correcte, y compris lorsque le circuit se complexifie : ils sont par exemple plus nombreux à prendre en compte l'ensemble du circuit et moins nombreux à raisonner avec un générateur à débit constant.

La séquence, en lien avec les recherches en didactique, instaure un rôle différent pour le maître, tantôt tuteur, tantôt médiateur. Elle cherche à rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances et veut donner une autre place à l'expérience. En un mot elle **révolutionne le contrat didactique** implicite de l'enseignement tel qu'il se pratique. L'expérience s'y prête volontiers, l'élève joue le rôle qu'on lui attribue, mais le maître... c'est lui qui va piloter de nouvelles interactions : il doit être profondément convaincu de la nécessité d'un changement et parfaitement maîtriser les nouveaux outils qui sont à sa disposition. Pour cela une réelle formation s'impose qui devrait d'abord sensibiliser les enseignants aux représentations, à l'état réel des connaissances des élèves avant enseignement, puis les initier aux théories sur l'apprentissage, et en particulier de la physique. Pour cela l'élève utilise ses représentations dont il doit mesurer les limites, pour que naisse le besoin du concept. Il doit être actif pour construire des connaissances nouvelles, puis éprouver leur pouvoir explicatif et prédictif sur des exemples variés. Ce qui conduit à repenser le rôle du maître et la place de l'expérience, test

d'hypothèses : elle permet la dévolution, l'enrôlement de l'élève dans la tâche qui est alors heureux de faire ce qu'il fait.

Nos observations ont montré que même des élèves non scientifiques, avec un enseignant formé à la didactique, pouvaient réaliser de grands progrès cognitifs. La démarche adoptée entraîne l'élève dans un processus d'apprentissage qui lui permettrait d'acquérir d'autant plus de connaissances qu'il s'intéressera et posera des questions (en section scientifique), mais aussi que son enseignant sera formé à le guider sur son chemin en lui ménageant des étapes. Ces élèves sont par exemple les seuls, six mois après enseignement, à faire appel à la résistance équivalente.

2 – Pour aller plus loin

Nous avons cherché à évaluer nos hypothèses d'apprentissage des bases de l'électrocinétique. Cette évaluation a permis d'observer les raisonnements des élèves concernant l'intensité et l'ordre dans lequel ils les empruntent. Nous avons aussi croisé de nombreuses questions auxquelles nous n'avons pas pu nous intéresser. En voici quelques unes :

L'intérêt d'une approche qualitative apparaît clairement après cette expérimentation : il nous est apparu qu'elle pouvait constituer une aide, mais insuffisante, pour que l'élève transpose intégralement et directement sa connaissance sous la forme de relations littérales. Il reste à imaginer des étapes pour **le passage au formalisme**. Nous avons observé qu'ils raisonnent mieux qu'ils ne calculent et en avons analysé quelques causes. Il y aurait certainement à ménager des transitions entre la représentation et les propriétés qualitatives de chaque concept, sa représentation symbolique, la traduction des propriétés par un formalisme. De même pour passer de l'interdépendance qualitative des concepts à leur mise en relation formelle au sein de la loi d'Ohm, ou pour rendre le concept de résistance équivalente opérationnel...

La séquence a permis des progrès qui se sont manifestés au niveau des réponses qualitatives ou numériques mais ces derniers se sont trouvés, nous semble-t-il, limités sur les questions numériques portant sur les circuits mixtes. Le raisonnement qualitatif paraît bien préparer au formalisme, mais il appartient à un autre registre cognitif. Comment aider l'élève à décroquer ses connaissances en construisant des passerelles pour les relier ?

D'autres pistes de recherche peuvent se trouver au niveau **des chemins d'apprentissage** des concepts. Nous avons conscience d'avoir réalisé un premier travail de défrichage qui reste à affiner. Pour l'intensité nos observations, en lien avec notre démarche d'apprentissage, se trouvent correspondre à la hiérarchie cognitive, et à l'évolution de la fréquence des raisonnements en fonction du niveau d'étude. D'autres approches du concept conduiraient-elles l'élève à emprunter le même chemin ?

L'observation des réponses concernant le concept de d.d.p. aux bornes d'éléments appartenant à des circuits mixtes nous a révélé que certains élèves ont mis au point des lois simplifiées permettant des réponses rapides, tel le raisonnement à d.d.p. constante. Constituent-elles des étapes d'apprentissage de ce concept, comme le raisonnement à courant constant pour celui d'intensité ?

Pour ces deux concepts, lorsqu'il y a partage, il commence le plus souvent par être égal avant de devenir différencié sur un montage à deux récepteurs, puis redevient égal lors de la première analyse d'un circuit mixte. Ces réponses présentent un gap plus faible à franchir puisqu'elles ne prennent pas en compte l'ensemble du circuit. Elles permettent parfois aux élèves de fournir la réponse correcte.

Ces propriétés, au domaine de validité réduit à des situations particulières, que l'élève généralise abusivement à tout circuit, sont-elles une conséquence de l'enseignement reçu au collège, ou constituent-elles des étapes nécessaires pour certains élèves ?

De même nous avons observé un réinvestissement qualitatif de la représentation de la résistance comme frein à la circulation. Il apparaissait plus vite et pour davantage d'élèves que la représentation de son rôle conducteur. Son aspect conducteur semblerait plus difficile à construire. Une association de résistances qui pourrait être remplacée par une seule résistance équivalente qui aurait le même effet sur le débit est une représentation à laquelle peu d'élèves ont accédé. Nous avons dû aller trop vite, sauter des étapes. Sans doute faut-il prendre le temps :

- de construire le circuit équivalent constitué du générateur et de la seule résistance équivalente, des circuits équivalents intermédiaires avec les résistances équivalentes partielles ;
- de les utiliser pour des prévisions, de les vérifier par des tests d'hypothèses...

Le circuit équivalent serait une nouvelle opportunité d'aborder autrement le système circuit. Dans ce circuit simplifié, la résistance équivalente est reliée au générateur. Son analyse pourrait déboucher sur un conflit cognitif entre la représentation du générateur à débit constant et le comportement réel du circuit.

Une recherche pourrait également porter sur le **concept d'interaction**. Dans quelque domaine de la physique ou de la chimie où il se trouve abordé, seule une minorité d'élèves arrive à se le représenter. La séquence a essayé de faire évoluer les représentations causales au sein du circuit à l'aide d'une analogie mécanique. Elle a permis à des élèves d'accéder au raisonnement systémique. Mais plus généralement, comment faire évoluer cette forme de raisonnement causal linéaire (A agit sur B) en une relation causal bouclée (A agit sur B tout comme B agit sur A) ce qui aboutit à un état d'équilibre pour le système A-B ?

Nous avons utilisé les **interactions sociales en classe**. Il s'est établi des interactions entre élèves. Nous avons fait le choix de les ignorer dans l'analyse. Nous n'avons pas cherché à les observer, enregistrer, étudier. Elles ont participé à l'apprentissage avec les interactions de l'élève avec le phénoménal, ou avec le maître. C'est un autre domaine de recherche qui compléterait notre étude et permettrait de la préciser.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- ALLEGRE C. (1987) Point de vue. *Pour la science*, Novembre 1987.
- AMIGUES R. & CAILLOT M. (1990) Les représentations graphiques dans l'enseignement et l'apprentissage de l'électricité. *European Journal of Psychology of Education*, V (4), 477-488.
- ANTOINE M. (1982) Le niveau qualitatif dans l'initiation aux sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 643, 783-798.
- ARSAC G., CHEVALLARD Y., MARTINAND J.L. & TIBERGHIE A. (1991) *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble.
- ARTIGUE M. (1984) *Contribution à l'étude de la reproductibilité des situations didactiques*. Thèse, Paris VII.
- ARTIGUE M. (1988) Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, IX (3), 281-308. Grenoble.
- ASTOLFI J.P. & DELEVAY M. (1989) *La didactique des sciences*. Paris, PUF.
- ASTOLFI J.P. & CASTINCAUD F. (1992) La leçon que l'on fait ... et celle qu'ils apprennent. *Cahiers pédagogiques* 304-305, 89-93.
- ASTOLFI J.P. (1993) Trois paradigmes pour les recherches en didactique. *Revue française de pédagogie*, 103, 5-18.
- ASTOLFI J. P. (1996) Le paradoxe pédagogique. *Sciences humaines*, XII, 8-12.
- AUDIGIER F. & FILLON P. (1992) *Enseigner l'histoire des sciences et des techniques Une approche pluridisciplinaire*. Paris, INRP.
- AURIC F., CLEMENTE M., DUPIN J.J. & JOHSUA S. (1989) *Expérimentations d'approches hypothético-déductives de la physique en classe de seconde : conditions et évaluation. Volume 1 : enseignement de l'électrocinétique*. Rapport, groupe de recherche de la didactique de la physique de Marseille.
- AURIC F., CLEMENTE M., DUPIN J.J. & JOHSUA S. (1989) Une autre introduction des circuits électriques en classe de seconde. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 711, 161-175.
- BACHELARD G. (1938 / 86) *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BARRAL M. & JOURDAIN N. (1997) Optique en quatrième, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 793, 629-648.
- BECKERS J. (1995) «La pédagogie de la maîtrise» un modèle d'apprentissage soumis à la réflexion des enseignants et formateurs. *Pilotinfo*, X, Bruxelles.
- BEN-HAMIDA J. (1980) *Modèles de fonctionnement de circuits électriques chez les enfants de 12 ans*. Thèse, Paris VII.
- BENSEGHIR A. (1989) *Transition électrostatique-électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse, Paris VII.
- BENSEGHIR A. (1993) Signes + et - : perception du circuit électrique. *Trema* 3-4, 19-25. IUFM de Montpellier.
- BENSEGHIR A. & CLOSSET J.L. (1994) Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, 2, 31-47.
- BERGE P. (1997) Sciences et culture, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1793-1796.
- BESSON-G., CLAVEL C., GAIDIOZ P. & TIBERGHIE A. (1998) Enseignement de l'énergie, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 803, 605-617.
- BLOOM B.S. (1969) *Taxonomie des objectifs pédagogiques*. Montréal, Education nouvelle.
- BLOOM B.S. (1979) *Caractéristiques individuelles et apprentissages scolaires*. Bruxelles, Labor.
- BRASSAD C., LAVOIE M., LEVASSEUR J. & METIOUI A. (1996) The persistence of students' unfounded beliefs about electrical circuits : the case of Ohm's law. *International Journal of Science Education*, 18 (2), 193-212.
- BROUSSEAU G. (1984) *Le rôle du maître et l'institutionnalisation*. Actes de la 3^e école d'été de didactique des mathématiques, 43-50.
- BROUSSEAU G. (1986) *Théorisation des phénomènes d'enseignement des mathématiques*. Thèse d'état. Bordeaux I.
- BROUSSEAU G. (1986) Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, VII (2), 33-115. Grenoble.
- BRUNER J.S. (1960) *The process of Education*, Cambridge, Mass., Harvard University Press.
- Bulletin officiel du Ministère de l'Education Nationale* (1992) n° 31, Programmes des classes de quatrième, 2086-2112.
- Bulletin officiel du Ministère de l'Education Nationale* (1992) Nouveaux programmes de physique et chimie pour les classes de seconde, première et terminale des Lycées, numéro hors série du 24-09-92.
- Bulletin officiel du Ministère de l'Education Nationale* (1993) n° 14 Nouveaux programmes de physique et chimie pour la classe de troisième des collèges, 3721-3739.
- Bulletin officiel du Ministère de l'Education Nationale* (1995) n°5 du 9 Mars 1995.
- Bulletin officiel du Ministère de l'Education Nationale* (1998) n°10 du 15 Octobre 1998.
- CAILLOT M. (1984) La résolution de problèmes de physique : représentations et stratégies. *Psychologie française*, 29 (3-4), 257-262.

- CAILLOT M. (1988) Circuits électriques : schématisation et résolution de problèmes. *Technologies, Idéologies, Pratiques*. L'enseignement des circuits électriques, VII (2).
- CANAL J.L. (1996) *Courant, tension, résistance et énergie. Essai de conceptualisation des grandeurs fondamentales en électricité*. Thèse, Toulouse.
- CHALOUHI E. (1981) *Mécanismes cognitifs utilisés par les élèves et leurs professeurs dans la résolution d'un problème d'électrocinétique. Rôle de la correction du problème, en classe, par les professeurs*. Thèse, Paris VII.
- CHARLOT B. (1991) *Faire des mathématiques : le plaisir du sens*. Paris, Armand Colin.
- CHARNAY R. & MANTE M. (1990-91) De l'analyse d'erreurs en mathématiques aux dispositifs de remédiation : quelques pistes ... *Grand N*, 48, 37-64.
- CHARPAK G. (1996) *La main à la pâte : les sciences à l'école primaire*. Paris, Flammarion.
- CHARPAK G. (1997) Réflexion sur l'enseignement des sciences. Conférence à l'hôtel de région de Bordeaux. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1809-1810.
- CHAUVET F. (1994) *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principe d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse, Paris VII.
- CHEVALLARD Y. (1985) *La transposition didactique*. Grenoble.
- CHOMAT A., LARCHET C. & MEHEUT M. (1992) Modèle particulière et activité de modélisation en classe de quatrième. *Aster*, VII, 143-184.
- CLOSSET J.L. (1980) *Cours de physique générale, Electricité, Travaux pratiques*. Gembloux, Belgique.
- CLOSSET J.L. (1983) *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse, Paris VII.
- CLOSSET J.L. (1983) D'où proviennent certaines « erreurs » rencontrées chez les élèves et les étudiants en électrocinétique ? Peut-on y remédier ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 657, 81-102.
- CLOSSET J.L. (1988) Une possible méthodologie pour la recherche sur le raisonnement naturel en physique. Problématique et résultats dans le cas de l'électrocinétique. *Technologies, Idéologies, Pratiques*. L'enseignement des circuits électriques, VII (2), 43-58.
- CLOSSET J.L. (1989) Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 931-950.
- CLOSSET J.L. (1992) Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, XIV, 143-155.
- CLOSSET J.L. (1995) Raisonnements « électriques » à propos de circuits hydrauliques. *Actes du 56^e séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, 39-55.
- CLOSSET J.L. (2000) Quelques réflexions théoriques et méthodologiques à propos de l'élaboration et de la validation des séquences d'enseignement - apprentissage en tant que pratique de recherche. *Communication présentée au Symposium international*. Paris, 23-25 Novembre 2000.
- COHEN-TANNOUDJI C. (1997) *Quelques réflexions sur l'activité de recherche*. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1605-1606.
- COSGROVE M. (1995) A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity. *International Journal of Science Education*, 17 (3), 295-310.
- CRAHAY M. (1999) *Psychologie de l'Education*. Paris, PUF.
- DOISE W. & MUGNY G. (1981) *Le développement social de l'intelligence*. Paris, Interéditions.
- DOISE W. (1993) *Logiques sociales dans le raisonnement*. Delachaux et Niestlé.
- DUMAS-CARRE A. & GOFFARD M. (1997) *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*. Formation des enseignants. Paris, A. Colin.
- DUMAS-CARRE A. & WEIL-BARAIS A. (1998) *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Paris, Peter Lang.
- DUPIN J.J. & JOHSUA S. (1986) L'électrocinétique du collège à l'université : évolution des représentations des élèves et impact de l'enseignement sur ces représentations, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 683, 779-799.
- DUPIN J.J. & JOHSUA S. (1988) Conceptions en électrocinétique : permanences géographiques et évolution dans le temps. *TIP*, VII (2), 7-21.
- DUPIN J.J. & JOHSUA S. (1993) Electrocinétique en classe de seconde.. *Tréma* 3-4, 140-144. IUFM. Montpellier.
- DUSSEAU J.M., LEROUGE A. & MALAFOSSE D. (1999) Cadre, registre et espace de réalité en didactique de la physique. Article proposé à *Didaskalia*.
- DUSSEAU J.M., LEROUGE A. & MALAFOSSE D. (2000) Etude, en interdidactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège. Espace de réalité. *Didaskalia*, XVI, 81-104.
- DUVAL R. (1993) Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de sciences Cognitives de L'IREM de Strasbourg*, V, 37-65.
- EINSTEIN A. & INFELD L. (1968) *Evolution des idées en physique*. Petite bibliothèque, Payot.
- FAUCONNET S. (1981) *Etude de résolution de problème : quelques problèmes de même structure en physique*. Thèse, Paris VII.
- FRECHENGUES P. & DUSSEAU J.M. (1996 a) Les programmes actuels d'électricité en classe de quatrième, troisième et seconde analysés dans une perspective historique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 788, 1615-1626.

- FRECHENGUES P. & DUSSEAU J.M. (1996 b) L'enseignement de l'intensité et de la représentation de l'atome vu par les enseignants de sciences physiques à travers les nouveaux programmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 789, 1961-1979.
- GENZLING J.C. (1991) Construire des méthodes à l'école élémentaire : la séparation de variables et la modélisation. *Aster*, XII, 39-60.
- GIE H. (1997) Pour une culture scientifique et technique minimale. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1815-1824.
- GIORDAN A. (1983) Les représentations des élèves : outils pour la pédagogie ? *Cahiers pédagogiques*, 214, 26-28.
- GIORDAN A. (1996) Conceptions et raisonnements. *Cahiers pédagogiques*, 344-345, 57-59.
- GIORDAN A. (1996) Un tremplin pour l'apprentissage. *Sciences humaines*, XII, 48-50.
- GIRAUD C., DUCHER C., MARTY B., ASTRUC M. & ROGUES G. (1998) Français et démarche expérimentale en physique-chimie, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 803, 707-709.
- GOMATOS L. (1996) *Résolution de problèmes de physique en petits groupes : apports et difficultés*. Thèse, Paris VII.
- GUISEPPIN M. (1996) Place et rôle des activités expérimentales en sciences physiques. *Didaskalia*, IX, 107-118.
- HALBWACHS F. (1971) *Réflexions sur la causalité physique*. Les théories causales. Paris, PUF.
- HALBWACHS F. (1971) *Causalité linéaire et causalité circulaire en physique*. Les théories de la causalité. Paris, PUF.
- HALBWACHS F. (1973) *Histoire de l'explication en physique*. L'explication dans les sciences. Paris, Flammarion, 72-119.
- HALBWACHS F. (1974) *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel, Le Griffon.
- HALBWACHS F. (1975) La physique du maître entre la physique du physicien et la physique de l'élève. *Revue française de pédagogie*, 33, 19-29.
- HIRN C. (1998) *Transformation d'intentions didactiques par les enseignants : le cas de l'optique élémentaire en classe de 4^e*. Thèse, Paris VII.
- Instructions ministérielles pour l'initiation aux sciences physiques dans les collèges*. CNDP. Paris 1978.
- Instructions officielles pour le second cycle (sciences physiques)*. CNDP. Paris 1980.
- JENSEN P. (1997) Que font vraiment les physiciens ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1609-1618.
- JOHSUA S. (1982) *L'utilisation du schéma en électrocinétique : aspects perceptifs et aspects conceptuels*. Propositions pour l'introduction de la notion de potentiel en électrocinétique. Thèse, Aix-Marseille II.
- JOHSUA S. (1983) La « métaphore du fluide » et le « raisonnement en courant ». *Recherches en didactique de la physique*. Paris, CNRS 321-330.
- JOHSUA S. (1985) *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse de doctorat, Aix-Marseille II.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1988) *Représentation et modélisation : le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.
- JOHSUA S. (1989) Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29-59.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1989) *Représentations et modélisation : le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1989) Expérimentations d'approches hypothético-déductives de la physique en classe de seconde : conditions et évaluations. *Vol. I Enseignement de l'électrocinétique*. Rapport de recherche présenté le 1^{er} Juillet 1989.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1993) *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, P.U.F.
- JOHSUA S. (1993) *Après Vygotsky et Piaget. Perspectives sociales et constructivistes, écoles russes et occidentales*. Pédagogies en développement, De Boeck Université.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1994) Analogie et enseignement des sciences. *Didaskalia*, III.
- JOHSUA S. (1994) Quelques conditions d'évolution d'un objet d'enseignement en physique : exemple des circuits électriques. *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble.
- JONNAERT P. (1988) *Conflits de savoir et didactique*. Pédagogies en développement, De Boeck Université.
- JOURDES L. (1999) *Quel enseignement en électricité pour une classe de seconde ?* Mémoire professionnel, IUFM. Limoges.
- KAMINSKI W. (1991) *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*. Thèse, Paris VII.
- KHUN T.S. (1983) *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.
- KARIOTOGLOU P., KOUMARAS P. & PSILLOS D. (1995) Différenciation conceptuelle : un enseignement d'hydrostatique fondé sur le développement et la contradiction des conceptions des élèves. *Didaskalia*, VII, 63-90.
- KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1994) Devons nous utiliser des phénomènes évolutifs en introduction à l'étude de l'électricité ? *Didaskalia*, IV, 107-120.
- KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1997) Causal structures and counter-intuitive experiments in electricity. *International Journal of Science Education*, 19 (6), 617-630.

- LANGLOIS F. & VIARD J. (1993) Raisonnements dans la résolution de problèmes d'électrocinétique par des étudiants de licence. *Tréma* 3-4, IUFM. Montpellier 3-17.
- LARCHER C. (1994) Etudes comparatives de démarches de modélisation. *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP., Paris, 9-24.
- LAUGIER A. & DUMON A. (1998) Enseigner les sciences physiques avec de jeunes élèves : quelle épistémologie pour quelle démarche ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 806, 1257-1278.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1992) L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP., Paris, 171-231.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993) *Construire des concepts en physique*. Paris, Hachette.
- LE MOROUX G. (1999) Dans quelle mesure des élèves de seconde se sont-ils appropriés les concepts de l'électrocinétique après avoir suivi l'enseignement officiel français ? Mémoire de tutorat, DEA. Paris VII.
- LENA P. (1999) Désirs de science, désirs de vie. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 810, 7-17.
- MARTINAND J.L. & HOST V. (1980) Activités d'éveil scientifique à l'école élémentaire, INRP., Paris, 104.
- MARTINAND J.L. (1987) Modèle et simulation : en guise d'introduction, *Modèles et simulation*, Actes des neuvièmes journées internationales sur l'éducation scientifique. Paris VII, 34-43.
- MARTINAND J.L. (1988) Quelques apports des recherches en didactique à l'enseignement des sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 706, 891-913.
- MARTINAND J.L. (1992) Présentation, *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, INRP., Paris, 7-22.
- MEHEUT M. (1988) Modèle particulaire et activités de modélisation en classe de 4°. *Aster*, VII, 143-184.
- MEHEUT M. (1996) Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège. Questionnement et simulation. *Didaskalia*, VIII.
- MESSAGER J.C. (1987) Le concept de mesure. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 693, 525-532.
- MILLAR R. (1993 a) Students' understanding of voltage in simple series electric circuits. *International Journal of Science Education*, 15 (3), 339-349.
- MILLAR R. (1993 b) Students' understanding of voltage in simple parallel electric circuits. *International Journal of Science Education*, 15 (4), 351-361.
- MISSONNIER M.F. (1996 a) Etude et cohérence des raisonnements en électricité. *Mémoire de tutorat*, Paris VII.
- MISSONNIER M.F. (1996 b) Séquence d'enseignement d'électrocinétique en classe de seconde. *Projet de recherche*. Paris VII.
- PERRET-CLERMONT A.N. (1979) *La construction de l'intelligence dans l'interaction sociale*. Berne, Peter Lang.
- PIAGET J. (1967) Epistémologie de la physique. *Logique et connaissance scientifique*. La pléiade, Gallimard, Paris.
- PIAGET J. (1976) *La représentation du monde chez l'enfant*. Paris, PUF.
- PIAGET J. (1976) *Conversation libre avec Jean Piaget* (Bringuier J.C.) Laffont, Paris.
- PINELLI P. & LEFEVRE R. (1993) « Etudiants - chercheurs » une proposition en électrocinétique. *Aster*, 17, 65-87.
- POPPER K. (1985) *Conjectures et réfutations*. Paris : Payot.
- POPPER K. (1988) *La logique de la découverte scientifique*. Paris : Payot.
- POPPER K. (1997) *Toute vie est résolution de problèmes*. Actes sud, Paris.
- PSILLOS D., KOUMARAS P. & VALASSIADES O. (1987) Pupils representations of electric current before during and after instruction on D.C. circuits. *Journal of Research in Science and Technical Education*, 5 (2), 185-189.
- PSILLOS D., KOUMARAS P. & TIBERGHIE A. (1988) Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C. circuits. *International Journal of Science Education*, 10 (1), 29-43.
- QUERE Y. (1997) Enseignement des sciences et Histoire, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 797, 1801-1805.
- RISSET C.A. Concepts et modèles scientifiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 780, 5-17.
- ROBARDET G. (1990) Enseigner les sciences physiques à partir de situations-problèmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 720, 17-28.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.L. (1993) *Eléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques*. IUFM, Grenoble.
- ROBARDET G. (2001) Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 836, 1173-1189.
- ROSMORDUC J. (1979) *De Thalès à Einstein*. Etudes vivantes. Paris - Montréal.
- ROZIER S. (1988) *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Paris VII.
- RUHLA C. (1996) L'ordre et le désordre dans la matière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 780, 21-23.
- SAINT-JALM F. (2001) Enseigner la physique aujourd'hui, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 831, 425-436.
- SALTIEL E. (1988) *Un exemple d'apport de la didactique de la physique à l'enseignement : les exercices qualitatifs et les raisonnements fonctionnels*. LDPEs. Paris VII.
- SALTIEL E. (1998) Les documents « Insights » : qu'ont-ils de particulier ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 806, 1245-1249.
- SERE M.G. (1989) La formation des concepts décrivant les états de la matière au collège. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 911-929.

- SERE M.G., JOURNEAUX R. & WINTHER J. (1995) La mesure en terminale scientifique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 779, 1925-1926.
- SERE M.G., JOURNEAUX R. & WINTHER J. (1997) Enquête sur les objectifs des travaux pratiques dans les classes de seconde, de première S et de terminale S. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 796, 1377-1389.
- SHIPSTONE D.M. (1983) A study of secondary school pupils' understanding of current, voltage and resistance in simple D.C. circuits. Report of university of Nottingham. *International Journal of Science Education*, 18 (2), 143-162.
- SHIPSTONE D.M. & GUNSTONE R. (1984) Teaching children to discriminate between current and energy. *Aspects of understanding electricity*, Kiel, 287-298.
- SHIPSTONE D.M. (1985) Electricity in simple circuits. *Children's ideas in Science*. Open University Press. Milton Keynes.
- SHIPSTONE D.M. & al (1985) Le concept d'énergie : analyse du contenu didactique. *Aster*, III, 131-148.
- SHIPSTONE D.M. (1988) Pupil's understanding of simple electrical circuits. *Physics Education*, 23 (2), 92-96.
- SHIPSTONE D.M., von RHOENECK C., JUNG W., KARRQVIST C., DUPIN J.J., JOHSUA S. & LICHT P. (1988) A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10 (3), 303-316.
- SOUDANI O., SOUDANI M. & CROS D. (1999) Du côté de la recherche en didactique : Un T.P. « résolution de problèmes » sur l'électricité en quatrième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 810, 36-44.
- SUMMERS M., KRUGER C. & MANT J. (1998) Teaching electricity effectively in the primary school : a case study. *International Journal of Science Education*, 20 (2), 153-172.
- TIBERGHIE A. & DELACOTE G. (1976) Manipulations de circuits électriques simples. *Revue française de pédagogie*, 34, 32-44.
- TIBERGHIE A. (1983) Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens des notions de circuits électriques pour les élèves de 8 à 20 ans. *Recherches en didactique de la physique*. Paris, CNRS, 91-108.
- TIBERGHIE A. (1993) Analyse du texte initial et compte rendu du premier atelier d'électrocinétique: *Tréma 3-4*, 145-149, IUFM de Montpellier.
- TIBERGHIE A., ARSAC G. & MEHEUT M. (1994) *Analyse de projets d'enseignement issus de recherches en didactique* ; in « la transposition didactique à l'épreuve » Grenoble : La pensée sauvage.
- TIBERGHIE A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995) Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, 22, 423-444.
- TRICOIRE S. (1998) De l'idée à l'expérimentation : genèse de « La main à la pâte ». *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 806, 1151-1156.
- VENTURINI P. (1999) *Conception et évaluation d'une base de données hypermédia en électricité*. Thèse, Toulouse.
- VERGNAUD G. (1990) La théorie des champs conceptuels, *Recherches en didactique des mathématiques*, X, 2-3, 133-170.
- VIAU R. (1994) *La motivation en contexte scolaire*. Paris, De Boeck Université.
- VIENNOT L. (1977) *Le raisonnement spontané en mécanique élémentaire*. Thèse, Paris VII.
- VIENNOT L. (1989) L'enseignement des sciences physiques objet de recherche. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 899-910.
- VIENNOT L. (1993) Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants. *Didaskalia*, 1.
- VIENNOT L. (1996) *Raisonnement en physique*. Paris, De Boeck.
- Von RHOENECK C. (1981) Students' conceptions of the electrical circuit before physics' instruction. Proceedings of an international Workshop on Problems Concerning Students' representation of Physics and Chemistry Knowledge. *Pädagogische Hochschule, Ludwigsburg*, 194-212.
- VYGOTSKY L.S. (1978) *Pensée et langage*. Editions sociales, Paris.
- WEIL-BARAIS A. (1993) *L'homme cognitif*. Paris, PUF.
- WEIL-BARAIS A. (1993) Le raisonnement par analogie : facilitation ou obstacle à l'acquisition de connaissances nouvelles. *Raisonnement par analogie et acquisition de connaissances*. Actes des journées d'étude 25-27 Novembre 1993, Paris VI.
- WINNYKAMEN F. (1996) Approche psychologique de la tutelle. In A.DUMAS -CARRE & A. WEIL-BARAIS *Tutelle et médiation dans l'Education Scientifique*. Berne, Peter Lang.

UNIVERSITE PARIS 7
Denis DIDEROT

ANNEXES de la THESE

Spécialité : Didactique des disciplines
Option : Didactique des Sciences Physiques

Présentée pour obtenir le grade de docteur par

Marie – France
ROUFFIAC - MISSONNIER

**Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves
lors d'une ingénierie didactique
d'électrocinétique**

Soutenue le 18 Septembre 2002 devant la commission d'examen composée de

M. Samuel JOHSUA

Président du jury

M. Jean-Michel DUSSEAU

Rapporteurs

M. Christoph von RHOENECK

M^{me} Monique SAINT-GEORGES

Examineurs

M^{me} Edith SALTIEL

M. Jean-Louis CLOSSET

Directeur de thèse

Laboratoire de didactique des Sciences Physiques

PROGRAMMES
D' ELECTRICITE

4^e

Physique-chimie

524-4 g

Arrêté du 10 juillet 1992

(Education nationale et Culture : bureau DLC 2)

Vu L. n° 75-620 du 11-7-1975 ; L. n° 83-663 du 22-7-1983, mod. et compl. par L. n° 85-97 du 25-1-1985 ; L. n° 85-1371 du 23-12-1985 ; L. n° 89-486 du 10-7-1989 mod. ; D. n° 76-1303 du 28-12-1976 mod. ; D. n° 76-1304 du 28-12-1976 mod. ; D. n° 77-521 du 18-5-1977 mod. ; D. n° 85-924 du 30-8-1985 mod. ; D. n° 90-179 du 23-2-1990 ; D. n° 90-484 du 14-6-1990 mod. ; A. du 14-3-1977 mod. not. par A. 26-7-1990 ; A. 26-1-1978 mod. not. par A. 26-7-1990 ; A. 22-12-1978 mod. not. par A. du 26-7-1990 ; A. 14-11-1985 mod. par A. du 26-7-1990 ; A. 9-3-1990 ; avis du Conseil national des programmes ; avis CSE.

Programmes de physique-chimie applicables dans les classes de Quatrième et Quatrième technologique.

NOR : MENL9203073A

Article premier. — Les programmes de physique-chimie applicables dans les classes de Quatrième et de Quatrième technologique à compter de la rentrée scolaire de 1993 sont fixés par l'annexe jointe au présent arrêté.

Art. 2. — A cette date, les dispositions relatives aux programmes de sciences physiques pour les classes de Quatrième figurant en annexe de l'arrêté du 14 novembre 1985 susvisé, et pour les classes de Quatrième technologique en annexe II de l'arrêté du 9 mars 1990 susvisé, sont abrogées.

(J.O. du 25 juillet 1992 et B.O. n° 31 du 30 juillet 1992.)

PRINCIPES DIRECTEURS DE L'ENSEIGNEMENT
DE LA PHYSIQUE ET DE LA CHIMIE
AU COLLÈGE ET AU LYCÉE

1. PHYSIQUE

1.1. POSITION DU PROBLÈME

Les recommandations des instances de réflexion qui se sont succédé au cours des dernières années portent un éclairage nouveau sur ce que devrait être un enseignement scientifique à l'aube du XXI^e siècle. Ce sont d'abord le rapport du Collège de France, puis les « Principes pour une réflexion sur les contenus de l'enseignement » énoncés par la commission présidée par MM. Pierre Bourdieu et François Gros et plus particulièrement le Rapport de la mission de réflexion sur l'enseignement de la physique présidée par Pierre Bergé et enfin la déclaration du Conseil national des programmes de l'enseignement des sciences expérimentales qui constituent les fondements de ces programmes. Certaines orientations étaient déjà dans les travaux de la commission Lagarrigue et également dans les programmes précédents élaborés par l'inspection générale. A ces réflexions s'ajoutent celles des associations de spécialistes.

1994 n° 1 1

524-4 g

Ces programmes ont été conçus en essayant de tenir compte également des critiques les plus souvent formulées :

L'enseignement actuel est souvent perçu comme coupé du monde extérieur ;

Il est parfois trop formel ;

Les programmes sont souvent trop vastes ;

Le baccalauréat favorise la recherche de recettes aux dépens de la compréhension.

Par ailleurs la suppression de l'enseignement des sciences physiques en 6^e et 5^e en 1991 conduit à un remaniement de l'ensemble des programmes.

1.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Il a paru essentiel d'établir une liste d'objectifs qui doit servir de cadre à l'enseignement de la physique, quel que soit le contenu d'un programme :

1. Cet enseignement ne se limite pas à former de futurs physiciens mais entend développer chez l'ensemble des élèves des éléments d'une **culture scientifique**.

2. Au travers de la démarche expérimentale, il doit former les esprits à la rigueur, **à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle**. Se faisant avec des sujets et des expériences attractives, il doit susciter la curiosité.

3. **Il doit être ouvert sur les techniques** qui, pour la plupart, des sciences de l'ingénieur aux sciences de la vie, ont leurs fondements dans les sciences physiques.

4. Il doit susciter des vocations de scientifiques (techniciens, ingénieurs, physiciens, enseignants...), pour cela être séduisant et ancré sur l'environnement quotidien et les **technologies modernes**.

5 - Au même titre que les autres disciplines scientifiques, la physique intervient dans les choix politiques, économiques, sociaux, voire d'éthique. L'enseignement de physique doit contribuer à la construction d'un **"mode d'emploi de la science et de la technique"** afin que les élèves soient préparés à ces choix.

6 - L'enseignement doit faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en **montrant que le monde est intelligible** et que l'extraordinaire richesse et complexité de la nature et de la technique peut-être décrite par un petit nombre de lois physiques universelles qui constituent **une représentation cohérente de l'univers**. Dans cet esprit, il doit faire appel à la **dimension historique** de l'évolution des idées en physique quelle que soit la classe. Il doit également **faire une large place aux sciences de l'univers : astronomie et astrophysique**.

7 - Il doit montrer que cette représentation cohérente est enracinée dans l'expérience : **les activités expérimentales ont une place essentielle**.

8 - L'enseignement fera largement appel aux applications qui au lieu d'être évoquées ou même oubliées seront valorisées, analysées sous l'aspect physique et technique. Il faut que les élèves sachent que c'est grâce aux recherches et aux connaissances fondamentales que des applications techniques essentielles ont vu le jour, et que réciproquement les applications peuvent motiver la recherche en physique. Les applications dans le domaine médical seront souvent discutées à cause de leur résonance sociale (du tensiomètre à la RMN, en passant par les RX et l'échographie ultrasonore)

9 - L'enseignement fera ressortir les relations transversales :

- . Physique et biologie (médecine)
- . " sciences du globe (météo)
- . " air et espace
- . " communication
- . " informatique
- . " musique et arts plastiques
- . " architecture (ponts, tour Eiffel, etc)

10 - Ancré sur l'environnement quotidien, l'enseignement devra utiliser au mieux les moyens modernes. **L'ordinateur sera l'outil privilégié pour la saisie et le traitement des données ainsi que pour la simulation. Il ne sera en aucun cas substitué à l'expérience directe, dont il sera le serviteur.**

1.3 L'idée d'un thème conducteur

Une des manières de répondre aux objectifs énoncés ci-dessus consiste à construire le programme de l'année autour d'un thème conducteur choisi en raison de la maturité et de l'intérêt des élèves, de son importance pratique et de son adéquation à la progression des connaissances dans la discipline. La physique est dans tout et le moindre objet peut être prétexte à une analyse et à une démarche scientifiques.

Il est intéressant de faire des aller-retours fréquents entre les éléments associés au thème et l'introduction des lois physiques à partir de quelques expériences simples mais fondamentales effectuées par le maître et (ou) les élèves.

Il y a lieu de faire une distinction très nette entre un enseignement par thème - objet d'étude - et le **thème conducteur qui n'est pas une fin en soi**, mais un support, une réserve d'idées, un ancrage sur le quotidien. Ainsi le professeur dispose d'une certaine liberté dans le choix des objets ou dispositifs en fonction des possibilités locales, de la demande et de l'intérêt des élèves. Quels que soient ces moyens, le professeur doit amener progressivement l'élève à l'acquisition des capacités d'analyse, des concepts, des lois physiques et de leur utilisation, des ordres de grandeur. A cet égard, la physique **conserve sa spécificité et reste différenciée de la technologie.**

A la fin de l'année, les élèves devraient avoir compris à la fois le fonctionnement d'objets techniques mais surtout les **lois physiques** (dans le cadre du niveau de la classe) et leur **caractère universel dégagé de l'objet**.

1.4 Activités support

On donne une liste d'activités qui peuvent jaloner le déroulement de la formation. Cette liste est présentée à titre d'exemple pour illustrer l'esprit du programme. Elle permettra de choisir, d'exploiter au mieux les idées suggérées en fonction des sensibilités de la classe, du contexte local et bien sûr des moyens des établissements.

La liste fait référence à des expériences qui, pour la plupart, peuvent être des sujets de TP où les élèves puissent effectivement manipuler eux-mêmes, comme la nécessité en est affirmée depuis longtemps. Plus concernés, les élèves sont plus responsables de la construction de leur propre savoir. Ces TP peuvent prendre plusieurs formes : apprentissages de savoir-faire relativement dirigés, séances où l'élève est amené à proposer lui-même un mode opératoire ou à organiser ses mesures pour répondre à une demande précise...

Cette liste suggère également la possibilité d'exploiter un certain nombre de documents qui peuvent être l'occasion d'un exposé ou d'un sujet de recherche plus élaboré qu'un exercice classique, voire d'un contrôle moins "scolaire".

Il peut arriver que ces activités mettent en jeu des notions ne figurant pas en tant que telles au programme. Ces notions n'interviennent alors que dans l'esprit d'une ouverture possible, accessible à peu de frais à partir du contenu stricto sensu du programme. Elles ne figurent donc pas dans les connaissances exigibles.

Les activités proposées font une large part à l'utilisation des moyens technologiques modernes (vidéo, ordinateur).

2 - CHIMIE

L'enseignement de la chimie, science de la transformation de la matière, a pour premier objectif, à côté des autres disciplines scientifiques et technologiques, de faire acquérir les méthodes propres aux démarches scientifiques et technologiques. Peut-être plus que les autres disciplines, la chimie rassemble l'ensemble de ces activités scientifiques et technologiques.

Le deuxième objectif, tout aussi fondamental, est de former le citoyen-consommateur au bon usage des produits chimiques qu'il est amené à utiliser dans sa vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.

Un dernier objectif est susciter des vocations pour les métiers de la chimie : ingénieurs, techniciens, chercheurs et professeurs dont le pays manque cruellement à l'heure actuelle.

Découvrir, observer, analyser, mesurer

L'inventaire des substances chimiques, minérales ou organiques qui interviennent dans la constitution des eaux, de l'air, des plantes, des animaux et des roches est le point de départ obligé pour une compréhension approfondie du milieu dans lequel nous vivons. Ce travail est loin d'être achevé et il faut en convaincre les élèves dès le

4

CHIMIE

collège en leur faisant prendre conscience que nous vivons dans un environnement chimique.

Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de se familiariser avec un certain nombre de techniques de séparation, d'identification et de mesure. Quelques unes d'entre elles peuvent être abordées au collège : extraction, filtration, décantation, précipitation, distillation, mesure de volume et de masse. D'autres (dosages volumétriques et/ou spectrophotométriques) seront abordées au lycée.

Raisonner

La chimie est par excellence le domaine du **raisonnement qualitatif** où il s'agit moins de savoir utiliser des concepts mathématiques que de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants.

Le qualitatif n'est pas la solution de facilité : il est beaucoup plus aisé de faire un calcul juste qu'un raisonnement pertinent. Il n'exclut pas l'efficacité : synthétiser l'érythromycine (1978), c'est savoir préparer le bon produit parmi les quelques 10^{22} isomères possibles.

La chimie, c'est aussi le domaine du **raisonnement par analogie** : telle réaction mise au point sur une molécule peut être transposée à d'autres et ouvre tout un champ nouveau d'application. Telle espèce chimique a le même cortège électronique qu'une autre et peut lui être substituée, permettant ainsi de moduler finement les propriétés physico-chimiques ou biologiques d'une molécule ou d'un matériau.

Expérimenter

L'attraction des jeunes pour les expériences de chimie est bien connue. Cette attirance s'explique par le caractère souvent spectaculaire (aluminothermie, mélanges tonnants, feux de Bengale, etc.) ou magique (bouteille bleue, encre invisible, gel magnétique, barreau luminescent, etc.) de ces expériences. Au delà de ce côté médiatique, les expériences de chimie sont souvent simples à mettre en oeuvre car elles nécessitent relativement peu de matériel spécialisé. Elles sont courtes et peu coûteuses.

Elles font appel à des techniques dont certaines sont utiles dans la vie quotidienne :

- techniques de transvasement,
- techniques de chauffage,
- techniques de formulation (cuisine, peinture),
- techniques de dissolution (soins du corps, entretien des vêtements, prise de médicament),
- techniques d'extraction (café, thé),
- techniques d'analyse (dureté et pH des eaux),
- techniques de mesure (température, volume, masse).

Elles sont l'occasion d'initier les élèves au respect des règles de sécurité.

Modéliser

La chimie a dû pour progresser se doter d'un langage qui lui est propre mais dont l'usage dépasse largement la discipline. Ce langage à base de symboles (H, C, Cu...) obéit à des règles strictes (valence) et permet aux chimistes de représenter dans l'espace à deux ou trois dimensions les structures qu'ils construisent. Les réactions chimiques peuvent être traduites dans ce langage sous forme d'équation-bilan. L'acquisition de ce langage et du vocabulaire qui y est associé (atome, molécule, ion, corps composé, élément, etc.) est nécessaire à qui veut "parler" chimie.

Sous-jacent à ce langage, figure un certain nombre de concepts abstraits qui ont conduit au modèle particulaire de la matière. L'enseignement de chimie peut être

5

l'occasion idéale de développer l'utilisation d'un modèle, d'en montrer ses limites, de le sophistication en fonction des besoins.

Par exemple, le modèle de l'atome commence par une sphère rigide au début du collège, puis se précise sous la forme d'un ensemble de noyau + électrons en fin de collège, enfin s'enrichit en seconde avec le cortège électronique en couches.

Toute la rigueur d'une discipline expérimentale est dans la bonne utilisation des modèles qu'elle utilise pour décrire une réalité souvent complexe. Les modèles n'ont nul besoin d'être mathématiques pour être rigoureux. La chimie comme la biologie fait largement appel à des modèles non-mathématiques pour progresser.

Concevoir, fabriquer, distribuer

La transformation de la matière constitue un champ illimité où peut se développer le talent du chimiste. Concevoir puis fabriquer de nouvelles molécules ou de nouveaux matériaux répondant aux besoins de la société, telle est l'activité principale de l'industrie et de la recherche en chimie. Pour y arriver, les chimistes empruntent différents chemins : ceux de l'imitation, de la modification, de l'invention et de l'innovation.

Imitation

Ils copient les substances naturelles en particulier dans le domaine des colorants, des parfums et des médicaments en raison de leur rareté, de la difficulté de leur extraction, ou du manque de régularité dans les ressources.

Modification

Ils modifient une molécule ou un cristal naturels pour en réduire les défauts, en exalter les qualités ou leur en conférer de nouvelles.

Invention

Alors que la plupart des scientifiques travaillent sur des matériaux fournis par la nature, le chimiste invente les produits qu'il étudie et aussi les réactions servant à les préparer.

L'histoire des matériaux est riche d'exemples qui ne trouvent pas d'analogues naturels : verres, céramiques, alliages, fibres synthétiques, matières plastiques élastomères.

Quelques "fantaisies" en cours d'étude : l'ordinateur chimique, des vêtements qui réchauffent quand il fait froid et qui rafraîchissent quand la température monte.

Innovation

Innover en chimie c'est : améliorer les rendements en trouvant les moyens d'assurer le meilleur rapport qualité/prix, éviter les produits secondaires, améliorer la sécurité de la production, préserver l'environnement.

Le chimiste ne se contente pas de concevoir et de fabriquer des molécules et des matériaux, il intervient aussi au niveau de la distribution et du retraitement de nombreux produits et pas seulement des produits chimiques : par exemples dans le conditionnement des aliments ou dans l'élimination et la récupération des déchets de tous ordres produits par la société.

Toutes ces démarches du chimiste et ces activités sociales de la chimie doivent être présentées aux élèves. De leur perception dépend en grande partie l'image que les élèves auront de la discipline.

Contenus

Compétences exigibles ou en cours d'apprentissage*

ELECTRICITE

1 Electrification de certains corps

Interprétation des expériences d'électrification : interaction électrostatique - attraction et répulsion - entre corps chargés par frottement ou par contact, existence de deux types de charge. Conducteurs et isolants.

On attend que l'élève sache :

Charger des isolants, reconnaître si deux corps isolants portent des charges de même signe ou de signes contraires.

Interpréter les éclairs, retenir le pouvoir des pointes.

2 Décharges électriques : Etincelles, éclairs et foudre.

Interprétation comme transfert brusque de porteurs de charge à travers un gaz.

Décharger des isolants et comparer les effets de divers matériaux mis en contact avec des isolants chargés.

Activités supports :

Expériences d'électrification et décharges, mise en évidence d'interactions entre pendules électrostatiques chargées, prévision et interprétation du sens de ces interactions.

3 Courant en circuit fermé. Illustrations sur des circuits principalement constitués de conducteurs métalliques.

Fermeture du circuit.

Circulation d'un courant permanent, circulation de charges (les électrons) : rôle du générateur.

Dipôle : définition, dipôle en série, en parallèle, illustration dans des cas très simples.

Fil conducteur de connexion : son rôle en série et en parallèle avec d'autres dipôles.

Réaliser des circuits fermés avec piles, lampes, diodes... Différencier les lampes à incandescence et à décharge. Identifier et réaliser des montages en série et en parallèle, vérifier les effets des fils conducteurs de connexion.

Mesurer une intensité, une tension.

Identifier les pôles d'une pile, mesurer la tension entre ses pôles en circuit ouvert, choisir dans un assortiment de lampes celle que l'on peut allumer avec une pile donnée. Montrer que le courant qui traverse la pile dépend du circuit.

Etendre ces activités à un générateur de tension continue.

Activités supports :

Manipulation d'un circuit hydraulique à plat, uniboucle, à pompe manuelle (liquide fluorescent parsemé de bulles d'air).

Allers et retours entre réalisation et schématisation pour des circuits simples comportant notamment des lampes et des DEL en série et en parallèle.

Vérifier la conservation de l'intensité et l'additivité des tensions le long d'un circuit série.

Contenus

Compétences exigibles ou en cours d'apprentissage*

Les notions suivantes seront d'abord introduites à propos du courant continu :

4 Intensité

Sens conventionnel du courant.
Intensité, mesure à l'ampèremètre, unités.

Conservation de l'intensité du courant le long d'un circuit série. Additivité des intensités dans deux branches parallèles d'un circuit fermé.

5 Tension

Usage d'un voltmètre, unités.
Répartition de la tension du générateur entre des dipôles en série. Egalité de la tension aux bornes de deux dipôles en dérivation.

Association de piles en série.

Montrer expérimentalement que si l'on change l'ordre des éléments d'un circuit série, on ne change aucune des valeurs des grandeurs (tension aux bornes et intensité) qui les concernent. Montrer de même qu'en changeant le circuit, par exemple en rajoutant une lampe en série, les valeurs des grandeurs changent, mais les lois demeurent.

Reconnaître qu'il peut y avoir une tension importante entre deux points entre lesquels ne passe aucun courant (situations d'étincelles avant déclenchement, circuit ouvert...), et inversement qu'un dipôle peut être parcouru par un courant sans tension notable à ses bornes (fil de connection, diode).

Utiliser une diode pour déterminer le sens d'un courant ou imposer une absence de courant.

Activités supports :

Prévisions qualitatives sur des circuits avec dipôles en série et en parallèle, ouverts ou fermés. Mesures et vérification des lois.

6 L'oscilloscope cathodique

Un voltmètre :

Principe de fonctionnement : circuit (fermé) du canon à électrons, relations qualitatives entre déviation des électrons et tension existant entre les plaques de déviation.

Mise en évidence de tensions variables. Cas particulier d'une tension alternative.

Un imageur :

Principe de formation de l'image sur un écran de télévision.

Utiliser un oscilloscope. Identifier les grandeurs figurées sur l'écran : le temps en abscisse, la tension en ordonnée.

2 ELECTRICITE

524.4

1-Electrification de certains corps :

Les effets électriques sont introduits par les expériences de frottement entre des corps isolants. Il n'y a pas ici à donner la structure de l'atome. Les expériences sont interprétées en mentionnant l'existence de très petits grains de matière portant une charge positive ou négative. On définit les corps neutres comme des corps portant autant de charges positives que de charges négatives, et les corps électrisés comme présentant un excès de l'un ou l'autre type de charge. On signale que les plus petits porteurs de charge négative s'appellent des électrons, et que ceux-ci ont tous la même charge. Le frottement est présenté comme une opération qui fait passer des électrons d'un corps sur un autre.

On peut aussi observer sans chercher à les expliquer les effets électriques sur des corps neutres (attraction de petits bouts de papier).

Les corps conducteurs et isolants sont présentés comme des corps où les porteurs de charge peuvent, ou, respectivement, ne peuvent pas, circuler. On signale que dans les métaux ce sont les électrons qui peuvent circuler à travers un réseau de porteurs de charge positive fixes. En chimie, on voit que dans les solutions conductrices, les porteurs de charge s'appellent des "ions" positifs ou négatifs, et que les uns et les autres peuvent se déplacer.

2-Les **décharges électriques** sont présentées comme une manifestation des interactions entre porteurs de charge positive et négative, qui s'accompagne de neutralisation partielle (réunion de porteurs de charge positive et négative, en quantité égale). On peut commencer à évoquer les conditions des décharges dans l'air (proximité des corps chargés, pouvoir facilitant des pointes), sans chercher à expliquer celles-ci : il est en effet hors de question d'évoquer la notion de champ électrique.

En revanche, il est important de souligner le caractère **limité dans le temps** de ces décharges, qui est lié à la diminution des stocks de charge en présence.

Le phénomène lumineux est présenté comme une conséquence de la recombinaison de porteurs de charge des deux signes.

3-4-5 Courant en circuit fermé, intensité et tension

On associe la double condition de fermeture du circuit et de la présence du générateur à l'existence d'un courant **permanent**, par opposition au caractère éphémère de la décharge. L'approche de ces deux grandeurs est d'abord totalement opérationnelle. Il s'agit de faire manipuler l'élève et de l'amener à réaliser des mesures à l'aide de deux appareils qui ne se branchent pas de la même manière. Les éléments conceptuels essentiels dont un début d'acquisition est visé sont les suivants :

- Ces deux **grandeurs** sont **différentes**, et ne constituent pas deux facettes plus ou moins équivalentes d'une même notion ("électricité" par exemple).

- Un circuit électrique est un ensemble d'éléments qui interagissent tous les uns sur les autres, en même temps. Les lois introduites concernant intensité et tension, notamment celles qui concernent un circuit série (conservation de l'intensité le long du circuit et additivité des tensions) **restent vraies à chaque instant**. Dans un circuit série, l'ordre des éléments n'a pas d'importance.

L'activité de schématisation prend une place importante : les élèves y manipulent des représentations symboliques codées comme ils l'ont encore peu, sinon jamais, fait.

6 L'oscilloscope cathodique

La présentation du principe de fonctionnement doit être très succincte. On indique seulement que la déviation du faisceau électronique est proportionnelle à la tension existant entre les plaques, et donc que l'oscilloscope est un voltmètre.

L'utilisation d'une tension extérieure continue, puis d'une tension lentement variable, permet de provoquer le déplacement de la tache lumineuse sur l'écran aussi bien vertical que horizontal. Un prolongement intéressant est de revenir sur la déviation du faisceau d'électrons comme procédé contribuant à la reconstitution d'une image point par point, et de situer un tel procédé par rapport à l'image de télévision et aux autres dispositifs imageurs évoqués dans le programme d'optique.

Le balayage interne horizontal à faible vitesse est ensuite mis en oeuvre pour figurer la variation dans le temps de signaux lentement variables (par exemple, la tension due au déplacement d'un aimant à l'intérieur d'une bobine). On peut alors présenter une tension alternative, sans autre exigence pour cette année que d'en connaître l'importance pratique majeure.

PRÉSENTATION DES PROGRAMMES DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

Le texte des programmes comporte :

Une colonne de *gauche* qui indique les *contenus* de base.

Cette colonne comprend également :

En physique, des *activités support* (caractères italiques). Les exemples fournis peuvent être exploités en expériences de cours, en T.P. en travaux de documentation, en faisant une large part à l'utilisation des moyens technologiques modernes (audio-visuel, informatique) ;

En chimie, des *activités de documentation* et des *expériences de cours et de travaux pratiques*.

Une colonne de *droite* qui présente les *compétences exigibles* ou en cours d'*apprentissage*. Les apprentissages dont la maîtrise n'est pas exigée en fin d'année sont signalés par un astérisque.

Les objectifs et des commentaires ont été intégrés à différents endroits des programmes.

La présentation retenue n'implique pas une progression obligatoire. Toute liberté est laissée à l'enseignement d'organiser son cours dans l'ordre où il le souhaite.

PROGRAMME DE PHYSIQUE DE LA CLASSE DE TROISIÈME

Objectifs généraux propres à la classe de Troisième

Les programmes de Quatrième et de Troisième doivent répondre à deux objectifs qui tiennent compte du public des élèves, ceux pour qui la classe de Troisième est la dernière année d'enseignement général et ceux qui s'apprennent à continuer dans le cycle général des études en lycée classique et technique.

Le choix des contenus du programme veut répondre à ces deux exigences : aborder des sujets en liaison avec la vie quotidienne, les transports et l'électricité domestique tout en continuant la formation scientifique amorcée en classe de Quatrième.

Les objectifs généraux annoncés pour cette classe sont réaffirmés pour la classe de Troisième :

Stimuler la curiosité des élèves en les informant sur leur environnement par l'introduction d'un certain nombre de concepts de base ;

Les conduire à acquérir des savoir-faire techniques et la maîtrise de règles de sécurité ;

Leur donner le goût d'une analyse aussi rigoureuse que possible des phénomènes ;

Aider au développement de qualités intellectuelles qui leur permettront, par la suite, de mieux maîtriser les informations reçues.

Au travers des notions répertoriées dans le programme, et des activités expérimentales associées, ou souhaite conduire les élèves à l'apprentissage d'un certain nombre d'attitudes :

→ Prendre l'habitude d'évaluer des ordres de grandeur et, par la même de comparer des valeurs numériques entre elles (utilisation des calculs avec puissance de dix) ;

Comprendre qu'un résultat numérique en physique n'a pas de sens s'il n'est pas accompagné d'une unité ;

Comprendre la signification d'un graphique et apprendre à exploiter celui-ci.

Le programme dans son ensemble introduit des concepts généraux importants :

Evolution d'un phénomène dans le temps et variation d'une grandeur en fonction du temps ;

Analyse et classification des effets subis par un système, notion de force ;

Notion de pression et relation force-pression. Application à la poussée d'Archimède et à la flottaison ;

Analyse de phénomènes à plusieurs variables dans le cas des lois de l'électricité ($P = UI$ et $U = RI$) ;

Modélisation d'un phénomène à l'aide d'une loi générale.

Les activités expérimentales peuvent être exploitées de diverses manières :

Analyse d'un objet pour introduire un phénomène ;

Conduite d'expériences simples pour analyser un phénomène déjà rencontré en cherchant à sérier les paramètres pertinents ;

Réalisation, voire conception, d'objets appliquant les phénomènes étudiés...

L'essentiel est que ces activités suscitent, chez les élèves, questionnement, recherche méthodique, découverte et appropriation de concepts nouveaux et de propriétés nouvelles. L'enseignement aura atteint son but s'il contribue à développer chez les élèves l'appétence de connaissance.

Horaires

Le programme a été établi sur la base d'un horaire annuel de trente heures.

Electricité et vie quotidienne (quatorze heures)

Contenus	Compétences exigibles ou *en cours d'apprentissage
1. TENSIONS ET COURANTS ALTERNATIFS :	ON ATTEND QUE L'ÉLÈVE SACHE :
1.1. Rappels sur tension et courant continu.	Que les porteurs de charge sont des électrons libres dans les métaux et des ions dans les solutions conductrices.
1.2. Tension alternative. Réalisation expérimentale, visualisation à l'oscilloscope. Période - Fréquence - Valeur maximale. Mesure de la valeur efficace d'une tension sinusoïdale.	Que dans le cas d'une tension alternative sinusoïdale, les porteurs de charges « oscillent sur place ». Qu'une tension alternative prend des valeurs positives et négatives. Utiliser un oscilloscope sur une voie pour caractériser une tension alternative (amplitude - fréquence).
Activités support : Réalisation manuelle d'une tension alternative (bobine-aimant). Graphe d'une tension alternative sinusoïdale en TBF (relevé d'une trentaine de points pendant environ 30 secondes). Etude de l'alternateur de bicyclette. Etude de la sortie alternative sinusoïdale d'un générateur basse tension 6V ou 12V, d'un générateur BF.	Utiliser un voltmètre, un ampèremètre. Que dans le cas d'une tension alternative sinusoïdale, l'indication du voltmètre s'appelle la tension efficace, qu'elle est reliée à la valeur maximale (facteur racine de 2).

2. LA TENSION DU SECTEUR

2.1. De la centrale à la prise de courant : phase, neutre, mise à la terre.

Disjoncteur. Risques d'électrocution, règles de sécurité.

2.2. Conversion de la tension du secteur. Tension redressée - Applications.

Activités support :

Montage illustrant le rôle du transformateur.

Tournevis testeur.

Etude de l'installation de la salle de physique du point de vue de la sécurité.

Pont à diodes - éventuellement lissage.

Adaptateurs (jouet, calculette), chargeur de batterie.

3. PUISSANCE ET ÉNERGIE ÉLECTRIQUE :

3.1. Chauffage et éclairage électriques.

3.1.1. Effet Joule dans un conducteur.

3.1.2. Énergie et puissance électriques.

Puissance maximale admissible dans un composant.

3.1.3. Cas particulier du conducteur ohmique. Loi d'Ohm (tension continue et alternative).

3.2. Moteur électrique, transformation de l'énergie électrique reçue en énergie de mouvement. « Pertes », notamment, par effet Joule.

3.3. Appareils domestiques et industriels. Exemples de contrôle d'énergie ou de puissance. Les ordres de grandeur des puissances. Rôle du compteur électrique.

Activités support :

Vérification des caractéristiques constructeur sur différentes lampes. Puissance nominale.

Détermination expérimentale de la puissance de différents appareils (radiateurs, fer à repasser, four électrique...).

Fusibles (destruction), résistances « électroniques » et résistances bobinées, (destruction), utilisation de l'ohmmètre, code des couleurs. Mesure de la résistance d'un fil de connexion.

Les règles élémentaires de sécurité concernant le secteur.

Que la tension du secteur est une tension alternative sinusoïdale de caractéristiques :

$$U_{\text{eff}} = 220 \text{ V}, U_{\text{max}} = 310 \text{ V}, \\ N = 50 \text{ Hz}, T = 20 \text{ ms}$$

Qu'un transformateur fonctionne qu'en courant alternatif

Le rôle du transformateur.

Comment obtenir une tension redressée à l'aide de plusieurs diodes.

ON ATTEND QUE L'ÉLÈVE SACHE :

La relation donnant la puissance reçue par un appareil en tension continue.

Que par effet Joule l'énergie reçue est transformée en chaleur.

Appliquer la loi d'Ohm dans des cas simples.

Que la résistance d'un fil conducteur dépend de ses caractéristiques (nature, longueur, section).

Qu'un moteur transforme l'énergie électrique essentiellement en énergie de mouvement.

Que si on le bloque, il chauffe et peut être détruit.

Tracer un graphique $V(I)$ et l'interpréter.

Analyser quelques cas de contrôle d'énergie ou de puissance reçues par un appareil.

Les ordres de grandeur de puissances électriques diverses.

Lire et interpréter les notices d'appareil, une facture E.D.F.

Ce programme s'inscrit dans la continuité du programme de Quatrième. Les objectifs généraux proposés dans l'introduction sont bien sûr maintenus mais en outre cette partie a pour but de familiariser l'élève avec les connaissances indispensables qui lui permettent de mieux maîtriser l'électricité de son environnement quotidien.

La présentation insiste sur les savoir-faire expérimentaux à faire acquérir, en particulier la manipulation d'appareils de mesure. Il y a lieu de garder à l'esprit que la manipulation est non seulement destinée à l'apprentissage de savoir-faire mais également à l'acquisition progressive des concepts : la réflexion doit être associée à l'action.

1. L'approche du caractère alternatif de la tension est résolument appuyée sur des manipulations simples qui aident à faire « sentir » la variation au cours du temps (cf. activités support).

L'introduction de la valeur efficace se justifie à partir de la comparaison entre les valeurs mesurées à l'oscilloscope et les valeurs mesurées au multimètre.

76

1994 n° 1

524-4 g

Caractéristique d'un conducteur ohmique (graphique).

Réalisation d'une maquette de moteur électrique en tension continue. Etude des puissances reçues et fournies quand le moteur tourne et quand il est bloqué ; risque de destruction.

Variation par rhéostat de la puissance reçue et fournie par un appareil, régulation par bilame de la puissance d'un appareil de chauffage.

Variation de l'intensité absorbée par un moteur à courant continu avec la charge.

Variation de la vitesse au moyen d'un dispositif électronique réglant la tension d'alimentation.

2. CHIMIE

L'enseignement de la chimie, science de la transformation de la matière, a pour premier objectif, à côté des autres disciplines scientifiques et technologiques, de faire acquérir les méthodes propres aux démarches scientifiques et technologiques. Peut-être plus que les autres disciplines, la chimie rassemble l'ensemble de ces activités scientifiques et technologiques.

Le deuxième objectif, tout aussi fondamental, est de former le citoyen-consommateur au bon usage des produits chimiques qu'il est amené à utiliser dans sa vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.

Un dernier objectif est de susciter des vocations pour les métiers de la chimie : ingénieurs, techniciens, chercheurs et professeurs dont le pays manque cruellement à l'heure actuelle.

DÉCOUVRIR, OBSERVER, ANALYSER, MESURER

L'inventaire des substances chimiques, minérales ou organiques qui interviennent dans la constitution des eaux, de l'air, des plantes, des animaux et des roches est le point de départ obligé pour une compréhension approfondie du milieu dans lequel nous vivons. Ce travail est loin d'être achevé et il faut en convaincre les élèves dès le collège en leur faisant prendre conscience que nous vivons dans un environnement chimique.

Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de se familiariser avec un certain nombre de techniques de séparation, d'identification et de mesure. Quelques-unes d'entre elles peuvent être abordées au collège : extraction, filtration, décantation, précipitation, distillation, mesure de volume et de masse. D'autres (dosages volumétriques et/ou spectrophotométriques) seront abordées au lycée.

RAISONNER

La chimie est par excellence le domaine du *raisonnement qualitatif* où il s'agit moins de savoir utiliser des concepts mathématiques que de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants.

Le qualitatif n'est pas la solution de facilité : il est beaucoup plus aisé de faire un calcul juste qu'un raisonnement pertinent. Il n'exclut pas l'efficacité : synthétiser l'érythromycine (1978), c'est savoir préparer le bon produit parmi les quelques 10^{22} isomères possibles.

La chimie, c'est aussi le domaine du *raisonnement par analogie* : telle réaction mise au point sur une molécule peut être transposée à d'autres et ouvre tout un champ nouveau d'application. Telle espèce chimique a le même cortège électronique qu'une autre et peut lui être substituée, permettant ainsi de moduler finement les propriétés physico-chimiques ou biologiques d'une molécule ou d'un matériau.

EXPÉRIMENTER

L'attraction des jeunes pour les expériences de chimie est bien connue. Cette attraction s'explique par le caractère souvent spectaculaire (aluminothermie, mélanges tonnants, feux de Bengale, etc.) ou magique (bouteille bleue, encre invisible, gel magnétique, barreau luminescent, etc.) de ces expériences. Au-delà de ce côté médiatique, les expériences de chimie sont souvent simples à mettre en œuvre car elles nécessitent relativement peu de matériel spécialisé. Elles sont courtes et peu coûteuses.

Elles font appel à des techniques dont certaines sont utiles dans la vie quotidienne :

Techniques de transvasement ;

Techniques de chauffage ;

Techniques de formulation (cuisine, peinture) ;

Techniques de dissolution (soins du corps, entretien des vêtements, prise de médicament) ;

Techniques d'extraction (café, thé) ;

Techniques d'analyse (dureté et pH des eaux) ;

Techniques de mesure (température, volume, masse).

Elles sont l'occasion d'initier les élèves au respect des règles de sécurité.

MODÉLISER

La chimie a dû, pour progresser, se doter d'un langage qui lui est propre mais dont l'usage dépasse largement la discipline. Ce langage à base de symboles (H, O, Cu, ...) obéit à des règles strictes (valence) et permet aux chimistes de représenter dans l'espace à deux ou trois dimensions les structures qu'ils construisent. Les réactions chimiques peuvent être traduites dans ce langage sous forme d'équation-bilan. L'acquisition de ce langage et du vocabulaire qui y est associé (atome, molécule, ion, corps composé, élément, etc.) est nécessaire à qui veut « parler » chimie.

Sous-jacent à ce langage, figure un certain nombre de concepts abstraits qui ont conduit au modèle particulier de la matière. L'enseignement de chimie peut être l'occasion idéale de développer l'utilisation d'un modèle, d'en monter les limites, de le sophistication en fonction des besoins.

Par exemple, le modèle de l'atome commence par une sphère rigide au début du collège, puis se précise sous la forme d'un ensemble de noyau + électrons en fin de collège, enfin s'enrichit en seconde avec le cortège électronique en couches.

Toute la rigueur d'une discipline expérimentale est dans la bonne utilisation des modèles qu'elle utilise pour décrire une réalité souvent complexe. Les modèles n'ont nul besoin d'être mathématiques pour être rigoureux. La chimie comme la biologie fait largement appel à des modèles non mathématiques pour progresser.

CONCEVOIR, FABRIQUER, DISTRIBUER

La transformation de la matière constitue un champ illimité où peut se développer le talent du chimiste. Concevoir puis fabriquer de nouvelles molécules ou de nouveaux matériaux répondant aux besoins de la société, telle est l'activité principale de l'industrie et de la recherche en chimie. Pour y arriver, les chimistes empruntent différents chemins : ceux de l'imitation, de la modification, de l'invention et de l'innovation.

Imitation

Ils copient les substances naturelles en particulier dans le domaine des colorants, des parfums et des médicaments en raison de leur rareté, de la difficulté de leur extraction, ou du manque de régularité dans les ressources.

Modification

Ils modifient une molécule ou un cristal naturels pour en déduire les défauts, en exalter les qualités ou leur en conférer de nouvelles.

Invention

Alors que la plupart des scientifiques travaillent sur des matériaux fournis par la nature, le chimiste invente les produits qu'il étudie et aussi les réactions servant à les préparer.

L'histoire des matériaux est riche d'exemples qui ne trouvent pas d'analogues naturels : verres, céramiques, alliages, fibres synthétiques, matières plastiques élastomères.

Quelques « fantaisies » en cours d'étude : l'ordinateur chimique, des vêtements qui réchauffent quand il fait froid et qui rafraîchissent quand la température monte.

Innovation

Innover en chimie c'est : améliorer les rendements en trouvant les moyens d'assurer le meilleur rapport qualité/prix, éviter les produits secondaires, améliorer la sécurité de la production, préserver l'environnement.

Le chimiste ne se contente pas de concevoir et de fabriquer des molécules et des matériaux, il intervient aussi au niveau de la distribution et du retraitement de nombreux produits et pas seulement des produits chimiques : par exemple dans le conditionnement des aliments ou dans l'élimination et la récupération des déchets de tous ordres produits par la société.

Toutes ces démarches du chimiste et ces activités sociales de la chimie doivent être présentées aux élèves. De leur perception dépend en grande partie l'image que les élèves auront de la discipline.

EDUQUER LE CITOYEN AU BON USAGE DES PRODUITS CHIMIQUES

Tout citoyen utilise, souvent dans le savoir, des produits chimiques pour se soigner, se laver, construire son logement, entretenir sa maison et son jardin, s'habiller, se transporter, se nourrir, etc.

Dans nos sociétés industrialisées, le citoyen consomme un nombre croissant de produits chimiques et rien n'indique que cette tendance sera inversée dans les décennies à venir.

L'éducation indispensable au bon usage des produits chimiques passe par une meilleure connaissance de ceux-ci. La sauvegarde de la santé et de l'environnement sont à ce prix.

Dans cette optique, il est important de sensibiliser très tôt les élèves sur le fait qu'on ne jette pas à l'évier, dans une rivière ou dans la mer n'importe quel produit car il n'y « disparaît » pas ; qu'avant d'utiliser un produit ménager, un engrais, un médicament, il faut lire attentivement le mode d'emploi et respecter scrupuleusement les conditions de sécurité qui s'y rattachent ; qu'on ne mélange pas sans risque des produits chimiques d'usage courant car ils peuvent « réagir » entre eux ; qu'on ne brûle pas n'importe quoi dans l'air sans risque pour la santé et l'environnement.

La compréhension de tous ces gestes de la vie courante ainsi que l'acquisition de comportements responsables nécessitent quelques connaissances de base en chimie que tout citoyen doit posséder. Elles doivent être acquises dès le collège.

Enfin, l'ignorance du citoyen est souvent source de peurs que certains sont toujours prêts à exploiter. Un sondage de l'I.F.O.P. en 1987 a révélé que, pour 37 % des personnes interrogées, les engrais sont considérés comme des produits dangereux, pour 21 % les antibiotiques et 12 % l'aspirine. C'est pourtant en partie grâce à ces produits, et à bien d'autres issus de la chimie, que l'espérance de vie des Français est passée de 50 à 77 ans depuis le début du siècle.

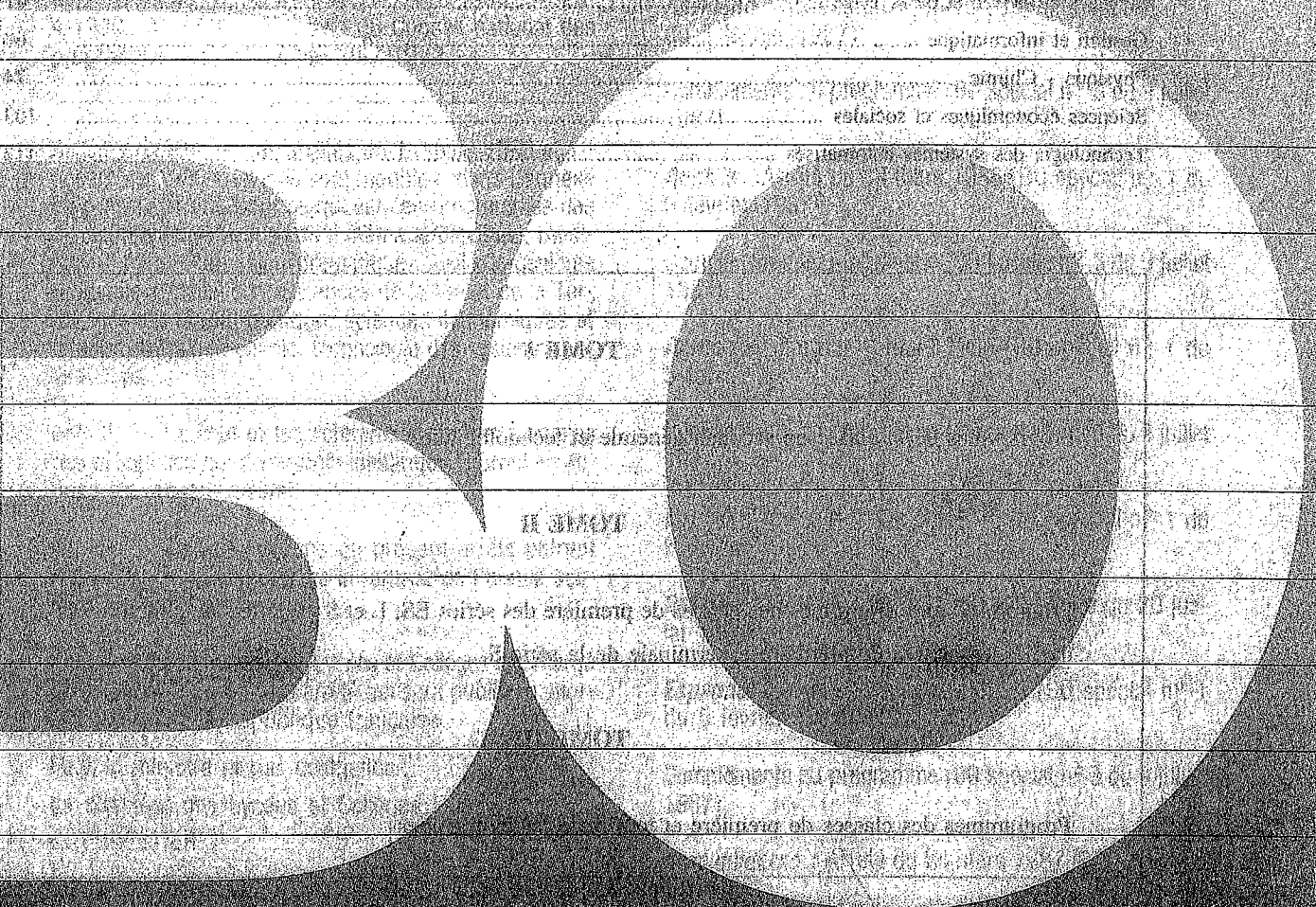
DU LIBRE CHOIX DU CONSOMMATEUR DE PRODUITS CHIMIQUES

A une époque où la publicité fait appel de plus en plus à du vocabulaire technique pour vendre [exemples : dentifrices au fluor, lessives avec ou sans phosphates, mousses à raser qui préservent la couche d'ozone, eaux minérales sans nitrate (sans benzène !), essence sans plomb enrichie en oxygène], l'éducation du citoyen consommateur en chimie reste à faire pour préserver son libre choix.

bulletin officiel
du ministère de l'éducation nationale

**NOUVEAUX PROGRAMMES
DES CLASSES DE SECONDE,
PREMIÈRE ET TERMINALE DES LYCÉES**

**TOME I :
PROGRAMMES DE LA CLASSE DE SECONDE
GÉNÉRALE ET TECHNOLOGIQUE**



numéro hors série du 24 septembre 1992

PHYSIQUE-CHIMIE

PRINCIPES DIRECTEURS DE L'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE ET DE LA CHIMIE AU COLLEGE ET AU LYCEE

1 - PHYSIQUE

1.1 Position du problème

Les recommandations des instances de réflexion qui se sont succédées au cours des dernières années portent un éclairage nouveau sur ce que devrait être un enseignement scientifique à l'aube du XXII^{ème} siècle. Ce sont d'abord le rapport du Collège de France, puis les "Principes pour une réflexion sur les contenus de l'enseignement" énoncés par la commission présidée par Messieurs Pierre Bourdieu et François Gros et plus particulièrement le Rapport de la mission de réflexion sur l'enseignement de la physique présidée par Pierre Bergé et enfin la Déclaration du Conseil National des Programmes sur l'Enseignement des Sciences Expérimentales qui constituent les fondements de ces programmes. Certaines orientations étaient déjà dans les travaux de la commission Lagarrigue et également dans les programmes précédents élaborés par l'Inspection Générale. A ces réflexions s'ajoutent celles des associations de spécialistes.

Ces programmes ont été conçus en essayant de tenir compte également des critiques les plus souvent formulées :

- l'enseignement actuel est souvent perçu comme coupé du monde extérieur ;
- il est parfois trop formel ;
- les programmes sont souvent trop vastes ;
- le baccalauréat favorise la recherche de recettes aux dépens de la compréhension.

Par ailleurs la suppression de l'enseignement de sciences physiques en 6^{ème} et 5^{ème} en 1991 conduit à un remaniement de l'ensemble des programmes.

1.2 Objectifs généraux

Il a paru essentiel d'établir une liste d'objectifs qui doit servir de cadre à l'enseignement de la physique, quel que soit le contenu d'un programme :

1 - Cet enseignement ne se limite pas à former de futurs physiciens mais entend développer chez l'ensemble des élèves des éléments d'une **culture scientifique**.

2 - Au travers de la démarche expérimentale, il doit former les esprits à la rigueur, à la **méthode scientifique**, à la **critique** et à l'**honnêteté intellectuelle**. Se faisant avec des sujets et des expériences attractives, il doit **susciter la curiosité**.

3 - Il doit être ouvert sur les techniques qui pour la plupart, des sciences de l'ingénieur aux sciences de la vie, ont leurs fondements dans les sciences physiques.

4 - Il doit susciter des vocations de scientifiques (techniciens, ingénieurs, physiciens, enseignants...), pour cela être séduisant et **ancré sur l'environnement quotidien et les technologies modernes.**

5 - Au même titre que les autres disciplines scientifiques, la physique intervient dans les choix politiques, économiques, sociaux, voire d'éthique. L'enseignement de physique doit contribuer à la construction d'un **"mode d'emploi de la science et de la technique"** afin que les élèves soient préparés à ces choix.

6 - L'enseignement doit faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en **montrant que le monde est intelligible** et que l'extraordinaire richesse et complexité de la nature et de la technique peut-être décrite par un petit nombre de lois physiques universelles qui constituent **une représentation cohérente de l'univers.** Dans cet esprit, il doit faire appel à la **dimension historique** de l'évolution des idées en physique quelle que soit la classe. Il doit également **faire une large place aux sciences de l'univers : astronomie et astrophysique.**

7 - Il doit montrer que cette représentation cohérente est enracinée dans l'expérience : **les activités expérimentales ont une place essentielle.**

8 - **L'enseignement fera largement appel aux applications** qui au lieu d'être évoquées ou même oubliées seront valorisées, analysées sous l'aspect physique et technique. Il faut que les élèves sachent que c'est grâce aux recherches et aux connaissances fondamentales que des applications techniques essentielles ont vu le jour et que réciproquement les applications peuvent motiver la recherche en physique. Les applications dans le domaine médical seront souvent discutées à cause de leur résonance sociale (du tensiomètre à la RMN, en passant par les RX et l'échographie ultrasonore).

9 - L'enseignement fera ressortir les relations transversales :

- . Physique et sciences de la vie (médecine)
- . " sciences du globe (météo)
- . " air et espace
- . " communication
- . " informatique
- . " musique et arts plastiques
- . " architecture (ponts, tour Eiffel, etc)

10 - Ancré sur l'environnement quotidien, l'enseignement devra utiliser au mieux les moyens modernes. **L'ordinateur sera l'outil privilégié pour la saisie et le traitement des données ainsi que pour la simulation. Il ne sera en aucun cas substitué à l'expérience directe, dont il sera le serviteur.**

1.3 L'idée d'un thème conducteur

Une des manières de répondre aux objectifs énoncés ci-dessus consiste à construire le programme de l'année autour d'un thème conducteur choisi en raison de la maturité et de l'intérêt des élèves, de son importance pratique et de son adéquation à la progression des connaissances dans la discipline. La physique est dans tout et le moindre objet peut être prétexte à une analyse et à une démarche scientifiques.

Il est intéressant de faire des aller-retours fréquents entre les éléments associés au thème et l'introduction des lois physiques à partir de quelques expériences simples mais fondamentales effectuées par le maître et (ou) les élèves.

Il y a lieu de faire une distinction très nette entre un enseignement par thème - objet d'étude - et **le thème conducteur qui n'est pas une fin en soi**, mais un support, une réserve d'idées, un ancrage sur le quotidien. Ainsi le professeur

dispose d'une certaine liberté dans le choix des objets ou dispositifs en fonction des possibilités locales, de la demande et de l'intérêt des élèves. Quels que soient ces moyens, le professeur doit amener progressivement l'élève à l'acquisition des capacités d'analyse, des concepts, des lois physiques et de leur utilisation, des ordres de grandeur. A cet égard, **la physique conserve sa spécificité et reste différenciée de la technologie.**

A la fin de l'année, les élèves devraient avoir compris à la fois le fonctionnement d'objets techniques mais surtout les **lois physiques** (dans le cadre du niveau de la classe) et **leur caractère universel dégagé de l'objet.**

1.4 Activités support

On donne une liste d'activités qui peuvent jaloner le déroulement de la formation. Cette liste est présentée à titre d'exemple pour illustrer l'esprit du programme. Elle permettra de choisir, d'exploiter au mieux les idées suggérées en fonction des sensibilités de la classe, du contexte local et bien sûr des moyens des établissements.

La liste fait référence à des expériences qui pour la plupart peuvent être des sujets de TP où les élèves puissent effectivement manipuler eux-mêmes, comme la nécessité en est affirmée depuis longtemps. Plus concernés, les élèves sont plus responsables de la construction de leur propre savoir. Ces TP peuvent prendre plusieurs formes : apprentissages de savoir-faire relativement dirigés, séances où l'élève est amené à proposer lui-même un mode opératoire ou à organiser ses mesures pour répondre à une demande précise...

Cette liste suggère également la possibilité d'exploiter un certain nombre de documents qui peuvent être l'occasion d'un exposé ou d'un sujet de recherche plus élaboré qu'un exercice classique, voire d'un contrôle moins "scolaire".

Il peut arriver que ces activités mettent en jeu des notions ne figurant pas en tant que telles au programme. Ces notions n'interviennent alors que dans l'esprit d'une ouverture possible, accessible à peu de frais à partir du contenu stricto sensu du programme. Elles ne figurent donc pas dans les connaissances exigibles.

Les activités proposées font une large part à l'utilisation des moyens technologiques modernes (vidéo, ordinateur).

2 - CHIMIE

L'enseignement de la chimie, science de la transformation de la matière, a pour premier objectif, à côté des autres disciplines scientifiques et technologiques, de faire acquérir les méthodes propres aux démarches scientifiques et technologiques. Peut-être plus que les autres disciplines, la chimie rassemble l'ensemble de ces activités scientifiques et technologiques.

Le deuxième objectif, tout aussi fondamental, est de former le citoyen-consommateur au bon usage des produits chimiques qu'il est amené à utiliser dans sa vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.

Un dernier objectif est susciter des vocations pour les métiers de la chimie : ingénieurs, techniciens, chercheurs et professeurs dont le pays manque cruellement à l'heure actuelle.

Découvrir, observer, analyser, mesurer

L'inventaire des substances chimiques, minérales ou organiques qui interviennent dans la constitution des eaux, de l'air, des plantes, des animaux et des roches est le point de départ obligé pour une compréhension approfondie du milieu dans lequel nous vivons. Ce travail est loin d'être achevé et il faut en convaincre les élèves dès le collège en leur faisant prendre conscience que nous vivons dans un environnement chimique.

Pour mener à bien cette tâche, il est nécessaire de se familiariser avec un certain nombre de techniques de séparation, d'identification et de mesure. Quelques unes d'entre elles peuvent être abordées au collège : extraction, filtration, décantation, précipitation, distillation, mesure de volume et de masse. D'autres (dosages volumétriques et/ou spectrophotométriques) seront abordées au lycée.

Raisonner

La chimie est par excellence le domaine du **raisonnement qualitatif** où il s'agit moins de savoir utiliser des concepts mathématiques que de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants.

Le qualitatif n'est pas la solution de facilité : il est beaucoup plus aisé de faire un calcul juste qu'un raisonnement pertinent. Il n'exclut pas l'efficacité : synthétiser l'érythromycine (1978), c'est savoir préparer le bon produit parmi les quelques 10^{22} isomères possibles.

La chimie, c'est aussi le domaine du **raisonnement par analogie** : telle réaction mise au point sur une molécule peut être transposée à d'autres et ouvre tout un champ nouveau d'application. Telle espèce chimique a le même cortège électronique qu'une autre et peut lui être substituée, permettant ainsi de moduler finement les propriétés physico-chimiques ou biologiques d'une molécule ou d'un matériau.

Expérimenter

L'attraction des jeunes pour les expériences de chimie est bien connue. Cette attraction s'explique par le caractère souvent spectaculaire (aluminothermie, mélanges tonnants, feux de bengale, etc.) ou magique (bouteille bleue, encre invisible, gel magnétique, barreau luminescent, etc.) de ces expériences. Au delà de ce côté médiatique, les expériences de chimie sont souvent simples à mettre en oeuvre car elles nécessitent relativement peu de matériel spécialisé. Elles sont courtes et peu coûteuses.

Elles font appel à des techniques dont certaines sont utiles dans la vie quotidienne :

- techniques de transvasement,
- techniques de chauffage,
- techniques de formulation (cuisine, peinture),
- techniques de dissolution (soins du corps, entretien des vêtements, prise de médicament),
- techniques d'extraction (café, thé),
- techniques d'analyse (dureté et pH des eaux),
- techniques de mesure (température, volume, masse).

Elles sont l'occasion d'initier les élèves au respect des règles de sécurité.

Modéliser

La chimie a dû pour progresser se doter d'un langage qui lui est propre mais dont l'usage dépasse largement la discipline. Ce langage à base de symboles (H, C, Cu...) obéit à des règles strictes (valence) et permet aux chimistes de représenter dans l'espace à deux ou trois dimensions les structures qu'ils construisent. Les réactions chimiques peuvent être traduites dans ce langage sous forme d'équation-bilan. L'acquisition de ce langage et du vocabulaire qui y est associé (atome, molécule, ion, corps composé, élément, etc.) est nécessaire à qui veut "parler" chimie.

Sous-jacent à ce langage, figure un certain nombre de concepts abstraits qui ont conduit au modèle particulaire de la matière. L'enseignement de chimie peut être l'occasion idéale de développer l'utilisation d'un modèle, d'en montrer ses limites, de le sophistiquer en fonction des besoins.

Par exemple, le modèle de l'atome commence par une sphère rigide au début du collège, puis se précise sous la forme d'un ensemble de noyau + électrons en fin de collège, enfin s'enrichit en seconde avec le cortège électronique en couches.

Toute la rigueur d'une discipline expérimentale est dans la bonne utilisation des modèles qu'elle utilise pour décrire une réalité souvent complexe. Les modèles n'ont nul besoin d'être mathématiques pour être rigoureux. La chimie, comme les sciences de la vie fait largement appel à des modèles non-mathématiques pour progresser.

Concevoir, fabriquer, distribuer

La transformation de la matière constitue un champ illimité où peut se développer le talent du chimiste. Concevoir puis fabriquer de nouvelles molécules ou de nouveaux matériaux répondant aux besoins de la société, telle est l'activité principale de l'industrie et de la recherche en chimie. Pour y arriver, les chimistes empruntent différents chemins : ceux de l'imitation, de la modification, de l'invention et de l'innovation.

Imitation

Ils copient les substances naturelles en particulier dans le domaine des colorants, des parfums et des médicaments en raison de leur rareté, de la difficulté de leur extraction, ou du manque de régularité dans les ressources.

Modification

Ils modifient une molécule ou un cristal naturels pour en réduire les défauts, en exalter les qualités ou leur en conférer de nouvelles.

Invention

Alors que la plupart des scientifiques travaillent sur des matériaux fournis par la nature, le chimiste invente les produits qu'il étudie et aussi les réactions servant à les préparer.

L'histoire des matériaux est riche d'exemples qui ne trouvent pas d'analogues naturels : verres, céramiques, alliages, fibres synthétiques, matières plastiques élastomères.

Quelques "fantaisies" en cours d'étude : l'ordinateur chimique, des vêtements qui réchauffent quand il fait froid et qui rafraîchissent quand la température monte.

Innovation

Innover en chimie c'est : améliorer les rendements en trouvant les moyens d'assurer le meilleur rapport qualité/prix, éviter les produits secondaires, améliorer la sécurité de la production, préserver l'environnement.

Le chimiste ne se contente pas de concevoir et de fabriquer des molécules et des matériaux, il intervient aussi au niveau de la distribution et du retraitement de nombreux produits et pas seulement des produits chimiques : par exemples dans le conditionnement des aliments ou dans l'élimination et la récupération des déchets de tous ordres produits par la société.

Toutes ces démarches du chimiste et ces activités sociales de la chimie doivent être présentées aux élèves. De leur perception dépend en grande partie l'image que les élèves auront de la discipline.

Eduquer le citoyen au bon usage des produits chimiques.

Tout citoyen utilise, souvent sans le savoir, des produits chimiques pour se soigner, se laver, construire son logement, entretenir sa maison et son jardin, s'habiller, se transporter, se nourrir, etc.

Dans nos sociétés industrialisées, le citoyen consomme un nombre croissant de produits chimiques et rien n'indique que cette tendance sera inversée dans les décennies à venir.

L'éducation indispensable au bon usage des produits chimiques, passe par une meilleure connaissance de ceux-ci. La sauvegarde de la santé et de l'environnement sont à ce prix.

Dans cette optique, il est important de sensibiliser très tôt les élèves sur le fait qu'on ne jette pas à l'évier, dans une rivière ou dans la mer n'importe quel produit car il n'y "disparaît" pas ; qu'avant d'utiliser un produit ménager, un engrais, un médicament, il faut lire attentivement le mode d'emploi et respecter scrupuleusement les conditions de sécurité qui s'y rattachent ; qu'on ne mélange pas sans risque des produits chimiques d'usage courant car ils peuvent "réagir" entre eux ; qu'on ne brûle pas n'importe quoi dans l'air sans risque pour la santé et l'environnement.

La compréhension de tous ces gestes de la vie courante ainsi que l'acquisition de comportements responsables nécessitent quelques connaissances de base en chimie que tout citoyen doit posséder. Elles doivent être acquises dès le collège.

Enfin, l'ignorance du citoyen est souvent source de peurs que certains sont toujours prêts à exploiter. Un sondage de l'IFOP en 1987 a révélé que pour 37% des personnes interrogées : les engrais sont considérés comme des produits dangereux, pour 21% les antibiotiques et 12% l'aspirine. C'est pourtant en partie grâce à ces produits et à bien d'autres issus de la chimie, que l'espérance de vie des français est passée de 50 à 77 ans depuis le début du siècle.

Du libre choix du consommateur de produits chimiques

A une époque où la publicité fait appel de plus en plus à du vocabulaire technique pour vendre (exemples : dentifrices au fluor, lessives avec ou sans phosphates, mousses à raser qui préservent la couche d'ozone, eaux minérales sans nitrate (sans benzène!), essence sans plomb enrichie en oxygène), l'éducation du citoyen-consommateur en chimie reste à faire pour préserver son libre choix.

De l'apprentissage de la sécurité

L'apprentissage de la sécurité constitue une dimension de l'enseignement de la chimie : extinction d'un feu (eau, neige carbonique, poudre), rôle des arrivées d'air dans une installation de chauffage au gaz, précautions à prendre lors du transvasement de liquides inflammables, etc.

PRESENTATION DES PROGRAMMES DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE

Le texte des programmes comporte :

- Une colonne de **gauche** qui indique les **contenus** de base.

Cette colonne comprend également :

. en physique, des **activités support** (caractères italiques) données à titre d'exemple : elles font une large part à l'utilisation des moyens technologiques modernes (audiovisuel, informatique) ;

. en chimie, des **activités de documentation** et des **expériences de cours et de travaux pratiques**.

- Une colonne de **droite** qui présente les **compétences exigibles ou en cours d'apprentissage**. Les apprentissages dont la maîtrise n'est pas exigée en fin d'année sont signalés par un astérisque.

- Les objectifs et des commentaires ont été intégrés à différents endroits des programmes.

La présentation retenue n'implique pas une progression obligatoire. Toute liberté est laissée à l'enseignant d'organiser son cours dans l'ordre où il le souhaite.

SECONDE GENERALE ET TECHNOLOGIQUE

1 - PHYSIQUE

LUMIERES ET SONS

HORAIRES : Le programme a été établi sur la base d'un horaire annuel de 35 heures classe entière et 22 heures de travaux pratiques.

OBJECTIFS D'ENSEMBLE

Ce programme de physique de la classe de 2de a été élaboré en tenant compte d'une part des objectifs généraux qui visent l'ensemble du cursus et d'autre part des caractéristiques propres à la classe de seconde. Il s'agit de faire comprendre au travers d'une **physique vivante**, bien ancrée sur les activités humaines professionnelles et ludiques :

- Que la physique contribue au niveau fondamental à **rendre notre monde intelligible** ou en d'autres termes qu'elle permet de "l'expliquer" avec un petit nombre de lois.
- Que **ces lois sont valables** dans leur domaine d'adéquation et nécessitent dans leur utilisation un langage mathématique souvent accessible (linéarité ou proportionnalité par exemple).
- Que **ces lois permettent de prévoir et d'imaginer** des phénomènes ou des objets nouveaux.
- Que ces lois sont à la base du fonctionnement de **tous les dispositifs techniques** et appareils en tous genres, de la haute technologie spatiale au domaine médical en passant par la vie quotidienne.

Une telle formation peut et doit être entreprise quelle que soit la classe, à condition que les sujets abordés soient scrupuleusement adaptés au niveau de compréhension du public concerné.

La classe de 2de est une classe charnière, à la fois fin de cycle et classe de détermination : toute la difficulté pédagogique réside dans la nécessité d'apporter **une culture générale de base accessible à tous** mais aussi de permettre aux élèves de s'orienter.

Ainsi, afin de ne pas décourager les élèves qui seraient aptes aux études scientifiques, mais qui pâtissent d'un rythme trop soutenu ou d'une formation prématurément abstraite, cet enseignement doit laisser aux élèves le temps d'apprendre à travailler.

S'adressant à un public non spécialisé, l'enseignement doit sensibiliser les élèves aux sujets en liaison avec l'actualité scientifique, technique, économique, tout en leur apprenant à prendre leurs distances par rapport aux informations qu'ils reçoivent (en particulier, démystifier les fausses sciences). Les futurs élèves de la voie scientifique sont, bien sûr, aussi concernés.

Quelle que soit son orientation future, un élève de 2de doit savoir à quoi sert la physique. **Il est aussi important pour des non scientifiques d'avoir une conception non biaisée des disciplines scientifiques que pour les scientifiques eux-mêmes.**

Les objectifs s'inscrivent dans un cadre général : d'une part ils s'appuient sur certains critères communs à toutes les disciplines, d'autre part ils reprennent certains objectifs de l'enseignement de la physique sur tout le cursus scolaire :

1 - Acquisition ou amélioration des méthodes de travail

Les activités correspondantes seront privilégiées en début d'année mais seront menées tout au long de l'année au fur et à mesure de l'introduction des contenus du programme. La liste non exhaustive qui suit est donnée à titre indicatif.

- Etudier un cours, dégager les résultats essentiels et les mémoriser.
- Utiliser un livre de physique, une revue en liaison avec le cours du professeur.
- Plus généralement chercher et exploiter une information (lecture d'un texte, extrait vidéo, utilisation d'un logiciel, analyser un texte d'exercice)
- Mettre en oeuvre sur des exemples simples, faisant partie des programmes antérieurs ou de ceux de l'année, les éléments de calculs nécessaires.
- Prendre des notes, faire des figures et des schémas simples.

2 - Pratique des sciences expérimentales

Les propositions ci-dessous seront reprises dans les années suivantes (1re et T) mais elles peuvent s'appliquer dès la 2de à condition de s'appuyer sur des exemples choisis pour être particulièrement bien adaptés au niveau de la classe. Elles sont également transposables en chimie.

- Rendre compte des observations (phrases à l'écrit et à l'oral : "ce qui se conçoit bien s'énonce clairement...", dessins, schémas).
- Réaliser une expérience à partir d'une liste de consignes, d'un schéma.
- A partir d'une expérience, d'observations ou de données se poser des questions, rechercher une explication, vérifier une hypothèse par la mise à l'épreuve des conséquences (prévisions) qu'elle implique.
- S'habituer à ne jamais écrire une formule sans connaître la signification de chaque symbole et pour chaque grandeur connaître les unités et si possible une méthode de mesure.
- Apprécier un ordre de grandeur.
- Analyser un résultat : l'exprimer à l'aide de mots, expliciter les dépendances fonctionnelles, vérifier qu'il n'est pas manifestement faux.
- Exprimer un jugement sur une explication proposée.

CONTENUS

Le programme de 2de prend appui sur un thème conducteur qui concerne l'environnement quotidien et qui suscite particulièrement l'investissement de nombreux adolescents : sons; reproduction des sons, musique et lumière.

Il offre la possibilité d'un travail expérimental varié permettant de sensibiliser l'élèves aux méthodes expérimentales en s'appuyant sur des applications "attractives".

Il apporte un certain nombre d'éléments conceptuels structurés et formalisés nécessitant des outils mathématiques en général déjà connus (cf colonne exigences).

La présentation, tout en évitant le côté dogmatique d'un enseignement plus traditionnel, s'attache à montrer que la compréhension des objets techniques ou des phénomènes rencontrés dans la vie quotidienne nécessite des connaissances variées. Celles-ci sont mises en place à chaque fois qu'elles sont nécessaires et seulement dans ce cas. Alors **elles doivent apparaître comme la traduction ou l'application de lois physiques générales (en petit nombre) et non pas comme des lois applicables seulement à l'étude de l'objet technique.** Le retour à l'exploitation d'expériences simples et fondamentales pour illustrer le phénomène mis en cause est alors indispensable pour faire comprendre la généralité de la loi sous-jacente.

Contenus

Compétences exigibles ou en cours d'apprentissage*

1. TENSIONS ET INTENSITES

1.1 Tension (ou ddp) entre deux points, grandeur algébrique. Loi des tensions.

Utilisation de l'oscilloscope pour visualiser une tension et mesurer ses caractéristiques (amplitude et fréquence)

1.2 Courant électrique : circulation des électrons et des porteurs de charge (ions). Loi des noeuds : loi de conservation de la charge.

1.3 Amplification de tension : amplificateur opérationnel.

Activités support.

Montages électriques simples (utilisant piles, potentiomètres, lampes et résistances, diodes, amplificateur opérationnel, générateurs d'amplitude variable, générateurs BF) sur lesquels les calculs peuvent être confrontés aux mesures.

Utilisation de l'oscilloscope en balayage : branchement, exploitation d'un oscillogramme.

Montages avec interface et traitement de données à l'ordinateur.

On attend que l'élève sache :

Régler un contrôleur, l'utiliser en voltmètre, en ampèremètre, en ohmmètre et interpréter les résultats affichés.

Réaliser un montage à partir d'un schéma simple

Que la tension est une grandeur algébrique

La notation $U_{AB} = V_A - V_B$, associée à la représentation fléchée.

La loi d'additivité des tensions.

Que deux points d'un circuit reliés par un fil de cuivre sont pratiquement au même potentiel.

Distinguer un générateur de tension d'un générateur possédant une résistance interne et définir le schéma électrique équivalent.

Que la tension est une mesure d'un état électrique.

Que tension nulle ne signifie pas nécessairement intensité nulle.

Qu'intensité nulle ne signifie pas nécessairement tension nulle.

La loi des noeuds et sa signification physique : loi universelle de conservation de la charge.

La loi d'Ohm pour un conducteur ohmique, *qu'il existe d'autres types de dipôles.

Le rôle d'un rhéostat, *celui d'un potentiomètre.

Les lois d'association des résistances et *sache les démontrer.

Le rôle de la "masse" dans un montage.

La signification de tensions d'entrée et de sortie.

Utiliser un oscilloscope pour mesurer les caractéristiques d'une tension sinusoïdale.

Qu'il existe des contraintes dans l'utilisation des divers éléments constitutifs d'un montage électrique.

* Confronter les résultats de mesure avec les prévisions théoriques associées à l'analyse d'un montage.

COMMENTAIRES

1 - TENSION ET INTENSITE (Horaire prévu : 10h classe entière, 4TP)

Cette première partie répond aux deux objectifs suivants :

- mettre au point la formulation et l'exploitation méthodique des lois fondamentales concernant tension et intensité déjà rencontrées dans les programmes de 4e et 3e. Par rapport à ces programmes, aucun concept nouveau n'est introduit. Il s'agit d'un approfondissement des concepts tension et intensité, courant continu et variable, amplitude, période et fréquence d'une tension ou d'un courant périodique et également de l'assimilation des lois indiquées.
- donner les outils nécessaires à l'analyse de la partie sur les sons.

Les concepts de tension et d'intensité ne sauraient être mis en place par les élèves d'entrée de jeu : leur approche se fait par les mesures et la mise en application des lois.

Dans cette perspective, il est donc conseillé que la première activité de l'élève soit expérimentale et axée sur la mesure de tensions aux bornes de différents éléments (y compris un fil, un interrupteur...) en circuit ouvert ou fermé. On structure rapidement les lois sur les courants et la loi d'Ohm, que les élèves ont déjà vues. Les circuits utilisés sont préférentiellement empruntés à des circuits d'usage courant ou les simulent : la physique est ancrée sur le quotidien et l'univers technique. Ces manipulations sont destinées à l'assimilation des lois. Dans le cadre de ces activités, un temps suffisant doit être consacré d'une part à la maîtrise de l'oscilloscope et d'autre part à l'analyse de l'amplificateur opérationnel utilisé en amplification.

A l'issue de cette partie les élèves doivent avoir acquis l'idée que les lois manipulées sont universelles. Par exemple **la loi des noeuds est une loi très forte** puisqu'il s'agit de la loi de conservation de la charge qu'on explique sous une forme simple mais rigoureuse de bilan.

STAGES MAFPEN

**RCB001C-RCB011C
RCB021C_RCB031C**

DOCUMENT D'ACCOMPAGNEMENT

PROGRAMMES DE SECONDE

PHYSIQUE - CHIMIE

Document provisoire

1 - L'ESPRIT ET LES CONTENUS

1.1 L'esprit

Dans la préface du livre "Enseignement de la Physique" par P. Metral (1900) il était déjà écrit : "le but n'est pas de faire de nos élèves des physiciens de profession, mais de leur faire connaître les grandes lois de la nature et de les mettre à même de se rendre compte de ce qui se passe autour d'eux ; dans cette vue, l'enseignement doit être à la fois très élevé, très simple et très pratique". Presque cent ans plus tard les recommandations sont les mêmes : il doit y avoir du vrai...

Force est de constater que les sondages auprès d'élèves montrent que les sciences physiques apparaissent souvent comme "coupées du monde extérieur, artificielles, sans finalité pratique, ennuyeuses"¹. L'enseignant de sciences physiques se trouve alors dans une situation paradoxale : faire découvrir la discipline qui est à la base de l'évolution des idées et des technologies dont bénéficie le monde moderne alors que l'image de cette discipline est négative dans une grande partie du public.

La classe de seconde est la dernière étape avant le choix quasi définitif qui engage pour une large part la destinée professionnelle de l'élève : notre responsabilité est donc très engagée dans la vision qu'il aura de la physique et de la chimie.

La question est : quelle image non biaisée de la physique peut-on donner à des élèves de 15 ans, d'origines très diverses en classe de seconde et comment atteindre ou du moins s'approcher des objectifs généraux énoncés en tête des programmes et qui sont repris plus loin? Eu égard à l'importance de notre discipline (à la fois représentation du monde et outil des techniques de l'ingénieur, de la biologie, des sciences de la terre et de l'univers), le défi est de taille : séduire et former.

Le premier enjeu est d'intéresser l'élève. Le physicien de métier s'amuse... souvent avec l'enthousiasme juvénile d'un jeune adolescent. Alors pourquoi l'élève de seconde ne s'amuserait-il pas avec le jeu sciences physiques ?

Cet enjeu "séduire et former" ne sera pas réussi bien sûr sans effort des élèves. Résoudre l'apparente incompatibilité entre séduction et effort fait partie du challenge. Une des manières d'y parvenir est d'apporter le maximum de transparence et de justification : de même que le musicien fait des gammes, ou que le sportif s'entraîne en effectuant des exercices pas toujours plaisants - ce qui n'étonne personne - les élèves doivent savoir que certains TP ou exercices procèdent de la même démarche.

D'entrée de jeu il s'agit de montrer que la physique ne se réduit ni à un ensemble de formules désincarnées, ni à un discours de salon. Elle est le moyen le plus puissant et le plus fiable pour comprendre et domestiquer la nature en vue de projets dont la justification dépasse le cadre de notre enseignement...

S'il y a lieu d'avoir une progression cohérente dans l'acquisition et

¹ Les analyses du GTD de physique sont corroborées par les résultats de l'enquête menée par les journalistes de Sciences et Vie (Oct 92)

l'approfondissement des concepts de la 4ème à la terminale, le choix des contenus ne doit pas être seulement dicté par la logique de cette progression. Les concepteurs des programmes ont donc puisé les contenus dans l'environnement des jeunes de 15-16 ans. Pour faire sérieux la physique n'a pas besoin d'être éloignée du quotidien : on peut faire de l'excellente physique avec un balladeur, un haut parleur, une guitare.... Au demeurant on peut faire de la physique avec n'importe quel objet. Le grand Faraday n'hésitait pas à faire six cours de physique-chimie à l'auditoire de l'Institution royale de Londres à partir de la "simple" bougie².

L'élève de seconde a déjà des connaissances non négligeables en physique et chimie. Il s'agit donc ici d'effectuer une synthèse des connaissances tout en abordant un sujet plus difficile mais passionnant : **nature et propriétés** d'abord des sons puis de la lumière. Pour le néophyte, le sujet est difficile car le son ne se voit pas, ne se touche pas et même ne s'entend pas dans le cas des ultrasons. C'est cet aspect "merveilleux" que nous devons faire sentir et exploiter ! Il y a donc là a priori une "magie" que l'élève va s'approprier en apprenant à la contrôler. Le but du cours de physique sera d'obtenir une représentation cohérente du phénomène qui rende compte, à un certain niveau, des propriétés observées. Le sujet est passionnant par bien des aspects techniques et expérimentaux ainsi que par sa modélisation macroscopique et microscopique (la vitesse du son dans les gaz n'est rien d'autre qu'une vitesse moyenne des molécules !).

A partir des acquis antérieurs et de quelques expériences simples il convient donc de dégager une problématique sur laquelle le cours sera construit.

Cette physique de seconde, sous des aspects séduisants, implique une **grande rigueur** d'abord dans l'observation, ensuite dans l'analyse, enfin dans la formalisation mathématique qui ne dépasse pas néanmoins la relation linéaire (tout comme l'ancien programme à cet égard).

1.2 Thème conducteur et environnement technique

Dans les programmes de physique de chaque classe figure un thème conducteur, en seconde lumières et sons, en première mouvements et énergie.

Les commentaires précisent qu'il s'agit de faire comprendre au travers d'une **physique vivante**, bien ancrée sur les activités humaines professionnelles et ludiques :

"- Que la physique contribue au niveau fondamental à rendre notre monde intelligible ou en d'autres termes qu'elle permet de " l'expliquer " avec un petit nombre de lois.

- Que ces lois sont valables dans leur domaine d'adéquation et nécessitent dans leur utilisation un langage mathématique souvent accessible (linéarité ou proportionnalité par exemple)

- Que ces lois permettent de prévoir et d'imaginer des phénomènes ou des objets nouveaux .

- Que ces lois sont à la base du fonctionnement de tous les dispositifs techniques et appareils en tous genres, de la haute technologie spatiale au

² Histoire d'une chandelle par M. Faraday. Bibliothèque des succès scolaires; J. Hetzel ed.

domaine médical en passant par la vie quotidienne ."

La référence à des objets ou à des dispositifs dont on analyse le fonctionnement pour le rattacher aux lois physiques est destinée à montrer à quoi sert la physique en pratique, à susciter l'intérêt des élèves et à montrer l'universalité des lois (en petit nombre) une fois extraites de l'objet; **les objets évoluent, les lois restent**³ (exemples : le récepteur de radio, la reproduction des sons du phonographe à rouleau au CD) . Ainsi, ce souci de mieux ancrer la physique sur l'environnement technique ne doit conduire en aucun cas à confondre cette nouvelle démarche avec un enseignement de technologie.

Il nous paraît important de préciser quel est le domaine de cet enseignement de technologie et de le situer par rapport à celui d'un enseignement de physique.

Le rapport Géminard (1984), base d'une éducation technologique , affirme que les objets et les procédés techniques doivent faire l'objet d'une lecture à la fois technicienne et sociale.

Il s'agit de considérer les objets comme :

- des agencements d'éléments matériels ou d'information (analyse structurelle)
- des systèmes de fonctions en interrelation , ce qui s'appuie sur des distinctions objet/milieu et fonction/opérateur (analyse fonctionnelle)
- des "machines" mettant en oeuvre des phénomènes empiriquement ou scientifiquement maîtrisés (les principes)

C'est sur cette dernière lecture des objets qu'il ne peut y avoir confusion entre l'interprétation du professeur de physique et celle du professeur de technologie : les enseignements sont absolument complémentaires. En effet si l'on examine les deux approches principales d'un enseignement de technologie:

- l'exploration du monde des objets et des procédés (observation, enquête, expérimentation)
- la réalisation d'objets ou de services ayant valeur marchande (cahier des charges, conception, fabrication, utilisation)

Il apparaît immédiatement que ces deux objectifs ne sont pas ceux du physicien. Quand celui-ci réalise un dispositif, c'est soit pour étudier un phénomène, soit pour créer un objet nouveau (transistor, laser).

Le professeur de STI, pour qui l'objet et ses fonctions sont premiers, analyse l'objet par rapport à sa situation et à son interaction avec le milieu extérieur. La réalisation passe bien sûr par des connaissances de physique qui sont essentiellement utilisées en tant qu'outil.

Pour le professeur de physique, la maîtrise des concepts et des lois est toujours l'objectif à atteindre avec l'ambition de faire ressortir que la physique est un élément de culture essentiel en montrant que le monde est intelligible et que l'extraordinaire richesse et complexité de la nature et de la technique peut-être décrite par un petit nombre de lois physiques très générales qui tendent à constituer une représentation cohérente de l'univers

³ Bien entendu dans leur domaine d'adéquation : par exemple, les lois de Newton sont contenues dans la relativité à la limite c infinie et restent valables aux faibles vitesses.

(principe 6 des programmes).

Pour ce faire, il peut partir aussi bien du phénomène naturel que de l'objet technique l'essentiel étant, au départ, d'être attractif et d'intéresser les élèves. Le thème conducteur, dans lequel le professeur va puiser les exemples points de départ de la réflexion et de l'expérimentation doit répondre à ces exigences. Il s'agit de mettre en oeuvre une dialectique permanente : analyse physique de l'objet, laquelle conduit à une loi physique étudiée sur une expérience épurée, retour sur d'autres objets pour montrer la richesse de la loi.

Pour illustrer ce qui précède, prenons l'exemple du haut-parleur. On peut commencer par un banal " comment ça marche? ", puis très rapidement susciter des questions éventuellement difficiles du type " mais finalement, qu'est-ce qu'un aimant? ". Le rôle du maître est alors de mettre de l'ordre dans les questions, de montrer que la réponse à ces questions exige une démarche structurée, de susciter l'envie d'en savoir davantage plus tard.

Ayant mis en évidence la loi $F = kI$ (§ 7), il s'agit de faire admettre que cette loi est universelle. Pour cela les expériences classiques sont utilisées : elles prennent alors toute leur valeur en illustrant la démarche scientifique et la méthode expérimentale dans laquelle le chercheur imagine une expérience "simple" en vue de maintenir constant ou de neutraliser certains paramètres pour n'en retenir qu'un et en évaluer ses incidences. La dernière étape et non la moindre constitue un retour vers les objets techniques : la loi physique à la base du moteur du TGV est la même que celle qui intervient dans le haut-parleur.

Un contrôle peut consister non seulement à vérifier que les élèves ont assimilé la relation linéaire entre la force et le courant, les unités et les ordres de grandeur mais aussi à leur soumettre quelques problèmes techniques qui peuvent avoir pour solution la force électromagnétique. Cette dernière activité a un aspect ludique qui peut être exploité.

Enfin, outre la complémentarité, il y a lieu de souligner l'interdépendance entre les sciences physiques et la technologie. Les technologies nouvelles, les "hautes technologies" n'auraient pas atteint le degré de développement actuel sans les découvertes de la recherche fondamentale. Réciproquement la recherche fondamentale n'aurait pu progresser sans l'apport d'appareillages techniques sophistiqués et de grande fiabilité qui n'existent que grâce à la qualité technologique de leur réalisation et point n'est besoin de visiter le CERN pour s'en convaincre !

2- COMMENT LIRE LE PROGRAMME DE PHYSIQUE

Il convient de définir le programme à partir des compétences attendues en fin d'année tout en respectant une cohérence sur l'ensemble du cursus.

Le programme de physique a été élaboré dans l'esprit défini par les principes directeurs parus au BO du 30 Juillet 1992. Plus particulièrement, à partir de situations pour la plupart expérimentales l'enseignement de la physique en classe de seconde tout comme dans les classes de quatrième et de troisième doit permettre de :

- stimuler la curiosité des élèves en les informant sur leur environnement,
- les conduire à acquérir des savoir-faire techniques et des règles de sécurité,
- leur donner le goût d'une analyse aussi rigoureuse que possible des phénomènes,
- distinguer les situations et appareils de vie courante qu'ils peuvent, même partiellement, expliquer de ceux qui relèvent de phénomènes qui leur échappent totalement.
- leur faire sentir au travers d'un petit nombre de lois physiques le caractère universel de celles-ci

La lecture du programme commence par la colonne de droite "compétences exigibles ou en cours d'apprentissage" qui fixe le "poids" du programme. Le contenu (colonne de gauche) est le support destiné à donner ces compétences. Le GTD de physique a donc volontairement limité les compétences en gardant à l'esprit que la formation des élèves s'effectuait pour la plupart d'entre-eux sur un cycle de trois années. On notera cependant le souci d'aboutir, après une démarche qui commence dès la classe de 4ème, à l'acquisition de méthodes voire de réflexes portant sur la démarche expérimentale : observation, formulation d'une hypothèse, modélisation (lois linéaires, proportionnalité), conception et réalisation d'une expérience visant à tester les hypothèses, mesures, formulation de conclusions rédigées. A cet égard, au sein de l'équipe d'enseignants, il est très souhaitable de favoriser des actions concertées relatives à la l'expression et à la communication (langage écrit et oral, vocabulaire).

Ainsi il y a lieu de se limiter aux seules exigences figurant dans la colonne de droite du programme: ce sont elles qui fixent réellement les bornes aux contenus.

Cette limitation n'exclut pas d'aborder ou de manipuler un domaine élargi pour illustrer ces contenus (voir activités support).

3 - REMARQUES D'ENSEMBLE

3.1 Sur l'analyse critique d'un résultat

Ordres de grandeur et unités. Une attitude à développer même chez les tout jeunes élèves est certainement celle qui consiste à évaluer un ordre de grandeur et à connaître certains d'entre eux. **On ne maîtrise pas un concept tant qu'on ne lui associe pas les ordres de grandeurs correspondants.**

L'acquisition de cette attitude passe d'abord par une comparaison en termes de plus grand, plus petit, semblable... Très vite pour répondre à cette question, la nécessité de faire une évaluation à l'aide d'une mesure aura dû s'imposer dans les classes antérieures.

En électricité, une réflexion sur les ordres de grandeurs des tensions est plus que nécessaire ne serait-ce que pour des raisons évidentes de sécurité. Il est nécessaire qu'un élève de 2^{de} connaisse l'ordre de grandeur des tensions courantes, piles, accumulateurs de voiture, tension alternative à 220 V, haute tension du poste de télévision et l'ordre de grandeur des intensités des courants faibles, moyens et forts.

Associé à l'aspect microscopique lorsque cela est possible les ordres de grandeurs permettent aux élèves d'approcher des concepts profonds de physique moderne, l'exemple précédemment indiqué sur la vitesse du son comparée à la vitesse d'une molécule de gaz sous-tend à la fois des concepts de structure discontinue de la matière, d'agitation thermique et d'interprétation statistique, étant entendu qu'il est hors de question de le dire !

Par ailleurs l'ouverture du programme sur les ondes sonores et lumineuses implique une appropriation des ordres de grandeurs des vitesses, des fréquences, des longueurs d'ondes sans laquelle aucune identification n'est possible : sons, ultrasons, pour la lumière : vitesse c , domaines radio, IR, visible, UV, X...

Homogénéité. Dans le même état d'esprit il est nécessaire qu'un élève puisse vérifier l'homogénéité d'une formule et montrer que l'unité utilisée convient (exemple: la dimension $[S.L] = L^3$ ou $[\lambda] = [vT] = L$)

Dépendances mutuelles entre grandeurs et cas limites.

Il importe d'habituer les élèves à travailler sur des expressions littérales. Ils peuvent alors recenser les variables qui interviennent dans l'expression de la grandeur considérée. Ils doivent pouvoir dans les cas simples dire dans quel sens varie cette grandeur lorsque chacune des variables varie séparément, éventuellement retrouver un cas limite correspondant à une valeur extrême d'une de ces variables et déceler ainsi les expressions qui sont manifestement fausses.

Par exemple, soit l'expression:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

pour la résistance équivalente R à deux résistances en parallèle R_1 et R_2 , on voit bien sûr que R dépend de R_1 et R_2 , qu'augmenter R_1 , R_2 étant maintenue constante, entraîne finalement une augmentation de R . Deux cas limites, celui où $R_1 = 0$ (court-circuit) et celui où R_1 est infini ("absence" de

résistance en parallèle) peuvent alors servir pour vérifier que l'expression ci-dessus conduit à un résultat vraisemblable alors que la relation $R = R_1 + R_2$ est manifestement fausse.

3.2 Sur l'évaluation de la qualité de la mesure. Incertitudes.

Le programme ne mentionne pas explicitement la mesure et les incertitudes. Il s'agit d'un problème implicite mais essentiel propre à chaque partie du programme. Le texte " Mesures et incertitudes au lycée" paru en annexe II des programmes de physiques en 1988 (page 49) reste actuel . La partie générale, à destination du professeur, est reproduite en annexe .

L'objectif prioritaire en classe de seconde est de faire comprendre que le résultat de toute mesure a un caractère probabiliste inévitable dont les causes vont de l'imperfection de l'appareil de mesure à la nature discontinue de la matière au niveau microscopique (cf exemple du bruit de fond d'un amplificateur).

Corrélativement il y a lieu de veiller à ce que les élèves n'aient pas la sensation que la physique n'est pas une science exacte car n'ayant pas la rectitude des mathématiques. Ainsi la loi des noeuds qui exprime la conservation de la charge ne peut être suspectée d'être une loi approchée même si la vérification expérimentale présente inévitablement un certain degré d'approximation. Ce degré d'approximation s'exprime lors de la présentation d'un résultat au travers du choix du nombre de chiffres significatifs.

On considère que les chiffres significatifs forment un groupe de chiffres dont les valeurs peuvent être considérées comme exactes (à l'exception du dernier chiffre à droite), compte tenu de la précision des mesures et des données.

Il est souhaitable que l'élève sache que:

- lors d'une mesure le nombre de chiffres significatifs dépend en particulier de la précision des appareils.
- le nombre de chiffres significatifs est indépendant du choix de l'unité et de la place de la virgule.
- les zéros placés à gauche ne sont pas significatifs (un des intérêts de la notation scientifique).
- si une grandeur a fait l'objet de plusieurs mesures indépendantes dans des conditions analogues, la moyenne arithmétique des résultats présente une incertitude plus faible que l'un quelconque des résultats.

Le rôle de l'informatique y compris au niveau de l'utilisation des calculettes est essentiel (cf § 6). Il est possible de traiter plus rapidement les résultats plus nombreux et mis en mémoire en améliorant la précision de la mesure obtenue immédiatement grâce au calcul de l'écart-type (cf. le texte " Mesures et incertitudes au lycée" évoqué ci-dessus).

3.3 Savoir-faire mathématiques utilisés

cf programme de mathématiques de 2de

Math.	Exemples
Proportionalité	$U = RI$ $F = kI$ $a = cT = c(1/f)$
Calculs sur 10^n (n entier relatif)	longueurs d'onde distances (années lumières)
Calculs avec $1/x$	$f = 1/T$ et $T = 1/f$, $1/R$
Fonctions circulaires	réfraction
Graphiques	
$y = ax$	$F = kI$ loi réfraction, mesure d'un indice
fonctions circulaires	lecture d'un oscillogramme

3.4 Sur le vocabulaire et l'expression

Il est important que les élèves comprennent que toute étude comporte en dehors de tout formalisme, tout d'abord une analyse qualitative du phénomène puis, en dernier lieu, celle des résultats trouvés. Ces étapes nécessitent une maîtrise suffisante du langage. Les élèves doivent apprendre en seconde à faire le compte-rendu d'une expérience d'une séance de TP, à rédiger une argumentation.

Il convient de favoriser des actions concertées relatives à l'expression et à la communication (langage écrit et oral, vocabulaire). Ces recommandations figurent au demeurant dans le rapport du Collège de France, dans celui de la mission Bourdieu-Gros et du groupe de réflexion sur

l'enseignement de la physique (P. Bergé).

Par ailleurs, si le souci de rigueur et de cohérence doit être constant, il ne doit pas conduire en classe de seconde (pas plus qu'ailleurs) à un discours et un vocabulaire qui ne seraient propres qu'à l'école. Par exemple si, en toute rigueur, on peut parler de la résistance d'un résistor on conviendra que ce langage n'est pas usuel et que l'électronicien de métier n'éprouve pas de malaise à parler d'une résistance de $47\text{ k}\Omega$! Ainsi, tout en veillant à la rigueur il paraît souhaitable d'utiliser le langage et les unités utilisées dans la vie pratique et professionnelle, sur ce dernier point les relations avec les unités légales du système international doivent être indiquées et les unités SI utilisées en priorité.

4- ANALYSE DU PROGRAMME . DEMARCHES PEDAGOGIQUES.

4.1 Remarques sur la suppression de la mécanique

Si la partie mécanique a disparu de la classe de 2de pour être transférée partiellement en classe de 1e S, c'est pour plusieurs raisons :

- * les difficultés des élèves en mathématiques (grandeurs vectorielles) oblitéraient cette partie intrinsèquement difficile.

- * manque d'intérêt des élèves (trop abstrait..)

- * les élèves de 1e S, seront plus mûrs et de plus ils seront déjà spécialisés "S"

- * en classe de 3ème, les élèves auront déjà étudié les interactions, des mouvements de translation rectiligne, des rotations autour d'axe fixe... c'est une culture minimum non négligeable pour les élèves qui ne feront presque plus de sciences physiques après la 2de .

4.2 Remarques sur l'introduction des ondes

Le choix délibéré du thème conducteur "lumières et sons" a été justifié plus haut. Ces phénomènes, des plus beaux et des plus mystérieux qui nous soient directement donnés aux sens et à la réflexion, constituent un instrument de choix pour séduire les élèves en les initiant à leur compréhension et donc à leur contrôle.

Comme il est dit plus haut cette initiation qui s'appuie à chaque instant sur l'expérience nécessite une grande rigueur et peu de formalisme, il ne saurait être question ici de décrire la propagation par $f(t-x/v)$. Par contre, l'analyse du phénomène doit conduire aux concepts contenus dans cette écriture : vitesse de propagation, reproduction du phénomène avec un retard x/v , pas de transport de matière etc.

4.3 Intensité-tension. Reflexion sur la progression

Une approche différente

Cette partie "électricité" fait l'objet d'une approche différente de celle en vigueur dans les anciens programmes. Cette approche :

- n'exploite aucune caractéristique de dipôle
- tient compte du fait que les élèves arrivant du collège ont reçu, soit en sciences physiques, soit en technologie un enseignement sur le sujet, qui effectivement peut être très différent d'un élève à l'autre mais au cours duquel ils ont déjà manipulé.
- s'appuie donc sur une introduction très opérationnelle des concepts tension et intensité
- affiche que l'assimilation de ces deux concepts est plus un but de cette partie qu'un acquis préalable : c'est en travaillant sur des montages (réalistes) que, petit à petit, les lois de base se mettront en place.
- privilégie l'interaction entre recherche théorique sur un montage et mise au point expérimentale, le plus possible en TP. Quelques exemples :

* Un TP sur un montage potentiométrique doit être considéré par les élèves comme un exercice visant à bien comprendre les notions de tension et d'intensité, les lois des circuits électriques mais également comme un montage équivalent au dispositif de contrôle de niveau ou de gain des circuits électroniques analogiques.

* Calcul et vérification expérimentale de la valeur V_s/V_e dans un montage d'amplificateur opérationnel

L'outil oscilloscope

- les notions sur le fonctionnement de cet appareil ont déjà été introduites en classe de 4ème et 3ème

- l'utilisation en classe de 2de peut se faire, soit progressivement dès les premières séances de TP, soit être reportée à la "charnière" entre la partie électricité et la partie "sons".

- l'élève l'utilise uniquement en balayage et doit savoir lire un oscillogramme (amplitude, période et fréquence).

L'évaluation horaire proposée n'inclut pas l'acquisition du maniement de l'oscilloscope et du générateur BF. Quelle que soit la progression choisie, celui-ci doit être finalement maîtrisé mis au point lors du premier TP sur l'émission sonore et avant l'analyse sur la propagation des sons. En effet, les problèmes de réglage de l'oscillo ne doivent pas occulter l'analyse du phénomène sonore.

Quelques idées clés sur la progression

1) Le 1er TP peut être consacré à la mesure de tensions dans un circuit à 2 éléments en série ou parallèle.

Objectifs : tension grandeur algébrique, loi des tensions. Utiliser un contrôleur

2) Pas de TP de "vérification" de la loi des noeuds, ni de TP sur la "vérification" de la loi d'Ohm $U = RI$.

La révision, plus exactement la mise au point de ces lois déjà vues en 4e et 3e, est faite en classe entière à l'aide de manipulations professeur. L'élève peut participer activement :

- contrôler $I = I_1 + I_2$ sur les valeurs numériques,
- contrôler que l'ordre des éléments d'un circuit série ne change pas la valeur de l'intensité.
- relever une série de valeurs (I, V) pour un conducteur ohmique, construire le graphique, exploiter le résultat.

3) A ce stade, les lois fondamentales sont toutes explicitées. On peut dire que l'essentiel du cours magistral du professeur est en place. Reste l'appropriation par les élèves. C'est l'objectif du reste de l'horaire imparti.

4) L'amplificateur opérationnel (AOP) est un composant couramment utilisé. Il permet de faire des montages simples présentant un intérêt réel et auxquels l'élève pourra appliquer les lois des circuits. En aucun cas il ne s'agit

de faire une étude qui tendrait vers l'exhaustivité des montages à AOP.

5) Les savoir faire expérimentaux à acquérir pour les deux parties suivantes du programme sont :

- réaliser un montage suivant schéma
- régler un contrôleur
- utiliser un oscilloscope en balayage
- utiliser un générateur BF

4.4 Autour du haut-parleur. Exemple de progression

L'élève travaille sur un objet familier, un phénomène dont il connaît l'existence⁴.

Il découvre le mode d'émission d'un son, le lien entre le son écouté et la façon dont il est créé.

Il apprend à observer, à repérer les éléments constitutifs indispensables.

Il approfondit le fonctionnement : vibration de la membrane observée en TBF, effet d'une tension continue.

Il est amené à étudier le phénomène fondamental qui est en cause, d'une part sur le HP lui-même, d'autre part sur un autre dispositif conçu à cet effet (par exemple la balance de Cotton). Il en dégage d'abord les variables pertinentes puis une relation quantitative ($F = kI$).

Il réinvestit la loi dans l'analyse de quelques autres applications (de l'expérience de cours au TGV)

Exemple de progression (6 à 7h , 3 TP)

Les phases marquées "Classe entière" sont d'une durée de 1h à 2h suivant leur insertion chronologique dans le déroulement de la semaine. Elles tiennent compte de la recherche ou de la correction d'exercices.

Remarque préliminaire. Le déroulement proposé suppose que l'élève soit déjà familiarisé avec l'oscilloscope. Si tel n'est pas le cas, il y a lieu de décompter un TP supplémentaire consacré à l'oscilloscope, ou de ne pas mettre en place le TP sur la stroboscopie dans la progression qui suit (cf remarques précédentes).

Classe entière : manipulations à l'appui, mise en évidence de la fonction du haut-parleur.

TP : écoute et visualisation à l'oscilloscope d'un son (avec écouteurs !) : lien

⁴L'exploitation de l'objet technique haut-parleur a été choisie pour sa facilité de mise en oeuvre et d'analyse. Cependant il doit rester un élément technique parmi d'autres et ne pas faire l'objet de développements excessifs (il ne doit pas avoir la destinée que connaît la targette en son temps !).

SECONDE - PHYSIQUE

page 1

PROGRAMME ET REFERENCES OFFICIELLES	A1 CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES	A2a SAVOIR-FAIRE EXPERIMENTAUX	A2b SAVOIR-FAIRE THEORIQUES
1. TENSIONS ET INTENSITES 1.1. Tension (ou ddp) entre deux points, grandeur algébrique 1.2. Courant électrique : circulation des électrons et des porteurs de charge	La tension est une grandeur algébrique ($U_{AB} = - U_{BA}$) ; unité : le volt (V) Loi d'additivité des tensions (loi des mailles) Amplitude, période et fréquence d'une tension périodique Tension du secteur; notion de tension efficace Le courant électrique est une circulation de porteurs de charge ; unité d'intensité : l'ampère (A) Sens conventionnel du courant Loi des noeuds Loi d'Ohm pour un conducteur ohmique Lois d'association des résistances Caractère universel des lois de la Physique Caractéristiques de l' AO idéal Rôle de la masse dans un montage Un émetteur sonore est une source vibrante ; exemples : cas des ultrasons Définitions de la période et de la fréquence d'un mouvement périodique : - circulaire - rectiligne Persistence des perceptions lumineuses Condition d'immobilité apparente Applications pratiques de la stroboscopie Ralentir cinématographique	Réaliser un circuit à partir de son schéma Utiliser le contrôleur en voltmètre : - mesurer la tension aux bornes de différents éléments - vérifier la loi d'additivité des tensions Utiliser un oscilloscope ; utiliser un GBF Mesurer les caractéristiques d'une tension variable : amplitude et fréquence Utiliser le contrôleur en ampèremètre Vérifier la loi des noeuds Utiliser un rhéostat et un potentiomètre Utiliser le contrôleur en ohmmètre Tracer la caractéristique d'un dipôle Respecter les limites de fonctionnement des composants utilisés Réaliser un montage amplificateur de tension avec un AO Mesure d'une vitesse de rotation Stroboscopie au ralenti d'un mouvement rapide	Représenter une tension par une flèche Interpréter les résultats de mesures Utiliser la loi d'additivité Utiliser la loi des noeuds et l'interpréter en termes de conservation de la charge Utiliser la loi d'Ohm Etablir le schéma équivalent d'un générateur (E,r) Démontrer et utiliser les lois d'association des résistances Confronter des résultats de mesure aux prévisions théoriques Exprimer l'immobilité apparente en termes de fréquences
1.3. Amplificateur de tension : amplificateur opérationnel 2. SONS ET ULTRASONS 2.1. Emission sonore 2.1.1. Exemples d'émetteurs 2.1.2. Période et fréquence d'un mouvement périodique 2.1.3. Analyse stroboscopique d'un mouvement circulaire uniforme			

le nouveau collège

PROGRAMMES DU CYCLE CENTRAL

5^e et 4^e

Livret 1

FRANÇAIS

MATHÉMATIQUES

HISTOIRE - GÉOGRAPHIE

ÉDUCATION CIVIQUE

**SCIENCES DE LA VIE
ET DE LA TERRE**

PHYSIQUE - CHIMIE

TECHNOLOGIE

ENSEIGNEMENTS ARTISTIQUES

**ÉDUCATION PHYSIQUE
ET SPORTIVE**

OPTION LATIN

► **MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**

**DIRECTION DES LYCÉES ET COLLÈGES
DIRECTION DE LA COMMUNICATION**

PHYSIQUE-CHIMIE

I Présentation

Ce programme de physique-chimie s'inscrit dans la logique de la rénovation du collège. Il prend en compte les programmes de l'école élémentaire ¹, ceux de la classe de 6^e et les observations des pratiques d'enseignement actuelles ².

A. Idées directrices

En fonction de l'argumentation développée ci-dessous, le programme se fonde sur les objectifs suivants :

- centrer l'enseignement sur l'essentiel et dégager un socle minimal de connaissances et de compétences ;
- renforcer la corrélation de l'enseignement de physique-chimie avec celui des autres disciplines scientifiques, en montrant à la fois sa spécificité et son apport aux autres disciplines ;
- mettre l'accent sur l'unité profonde des phénomènes physico-chimiques qui structurent le monde naturel et qui permettent notamment une vision rationnelle et globale de l'environnement.

Les programmes de l'école élémentaire comportent une rubrique « sciences et technologie ». Celle-ci définit les premiers éléments d'un enseignement scientifique sous forme de thèmes, sans que soit spécifié ce qui revient à tel ou tel champ disciplinaire.

La physique-chimie n'apparaît en tant que telle qu'à partir du cycle central du collège. Elle doit rester à ce stade fortement corrélée aux autres disciplines scientifiques sciences de la vie et de la Terre (SVT), technologie et mathématiques, tout en gardant un lien sensible avec l'histoire-géographie et en contribuant à l'éducation du citoyen en particulier dans sa relation avec l'environnement.

La physique-chimie contribue aussi à l'enseignement du français par la pratique d'activités documentaires, par la rédaction de comptes-rendus et par l'entraînement à une argumentation utilisant un vocabulaire bien défini ; les activités expérimentales, en amenant les élèves à formuler des hypothèses et à les confronter aux faits, développent la pensée logique.

1. BO n° 5 du 9 mars 1995

2. programme de 4^e de 1992

L'enseignement de physique-chimie a des objectifs qui lui sont propres et qu'il est possible d'énoncer pour le collège aussi bien que pour le lycée.

1. Il ne se limite pas à former de futurs physiciens et de futurs chimistes mais entend développer chez l'ensemble des élèves des éléments de culture scientifique indispensables dans le monde contemporain.

2. Au travers de la démarche expérimentale, il doit former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle. Avec des sujets et des expériences attractifs, il doit susciter la curiosité.

3. L'enseignement de physique-chimie doit former au raisonnement, tant quantitatif que qualitatif. L'étude de la matière et de ses transformations est par excellence le domaine du raisonnement qualitatif où il s'agit moins de savoir utiliser des outils mathématiques que de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants. Le qualitatif n'est pas la solution de facilité : il est beaucoup plus aisé de faire un calcul juste qu'un raisonnement pertinent.

4. Il doit être ouvert sur les techniques qui, pour la plupart, ont leur fondement dans la physique et la chimie.

5. Il doit susciter des vocations scientifiques (techniciens, ingénieurs, chercheurs, enseignants...), donc pour cela être motivant et ancré sur l'environnement quotidien et les technologies modernes.

6. Au même titre que les autres disciplines scientifiques, la physique et la chimie interviennent dans les choix politiques, économiques, sociaux, voire d'éthique. L'enseignement de physique-chimie doit contribuer à la construction d'un « mode d'emploi de la science et de la technique » afin que les élèves soient préparés à ces choix.

7. L'enseignement doit faire ressortir que la physique et la chimie sont des éléments de culture essentiels en montrant que le monde est intelligible. L'extraordinaire richesse et la complexité de la nature et de la technique peuvent être décrites par un petit nombre de lois universelles constituant une représentation cohérente de l'univers. Dans cet esprit, il doit faire appel à la dimension historique de l'évolution des idées. Il doit également faire une large place aux sciences de l'univers : astronomie et astrophysique.

8. Il doit montrer que cette représentation cohérente est enracinée dans l'expérience : les activités expérimentales ont une place essentielle.

9. L'enseignement fera largement appel aux applications. Il faut que les élèves sachent que grâce aux recherches et aux connaissances fondamentales, des applications tech-

niques essentielles ont vu le jour et que, réciproquement, les applications peuvent motiver la recherche.

10. Il devra former le citoyen-consommateur au bon usage des objets techniques ainsi qu'à celui des produits chimiques qu'il sera amené à utiliser dans la vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.

11. Ancré dans l'environnement quotidien, l'enseignement devra utiliser au mieux les moyens contemporains. L'ordinateur est un outil privilégié pour la saisie et le traitement des données ainsi que pour la simulation. Il ne sera en aucun cas substitué à l'expérience directe, dont il sera le serviteur.

En tant que sciences fondamentales des phénomènes naturels, la physique et la chimie mettent aussi à la disposition des SVT et de la technologie les notions qui leur sont nécessaires. Les lois qui constituent le noyau de leur domaine d'étude s'appliquent en effet aussi bien à la nature proprement dite, vivante ou non, qu'aux objets produits par l'homme.

L'enseignement de physique-chimie (vue ici de façon unitaire, la distinction entre les deux champs n'ayant rien de fondamental au niveau du collège) doit ainsi mettre à la disposition d'autres disciplines les premières notions sur la matière, ses états et ses transformations, la température, la lumière, l'électricité³. Dans le cadre d'un aller et retour continuuel entre les champs disciplinaires, il convient que ces notions physico-chimiques, fondées sur l'observation, soient aussi étayées par des exemples tirés des domaines d'autres disciplines.

La description du monde présentée au collège, en devenant plus quantitative, constitue un champ privilégié d'interdisciplinarité avec les mathématiques.

Cette interaction se manifeste tout particulièrement à propos de la mesure. Les unités de mesure ont été mentionnées dans les programmes de l'école élémentaire. En s'appuyant sur la pratique de la mesure, l'enseignement de physique-chimie du cycle central du collège doit développer ce champ de connaissances qui est aussi indispensable à la formulation du discours des autres sciences que vital pour la formation du citoyen.

L'interaction avec les mathématiques est tout aussi essentielle pour la manipulation des nombres qui sont le résultat de la mesure, la physique-chimie venant alors illustrer des concepts tels que les puissances de dix par l'apport de la notion d'ordre de grandeur.

3. Ces éléments sont mentionnés explicitement dans les projets des programmes de SVT et de technologie qui entrent en vigueur en 6^e à la rentrée 1996.

En ce qui concerne les grandes orientations prévues pour le programme de la classe de 3^e et sur la base des programmes actuels, les remaniements envisagés sont :

- l'intégration aux rubriques du programme de 3^e de sujets qui ne sont plus traités dans le projet pour la classe de 4^e (décharge électrique, ions, pH, formation des images) ;
- l'allègement très sensible des rubriques « propulsion et moyens de transport » et « comportement chimique des matériaux dans notre environnement » et, à un degré moindre, de la rubrique « électricité et vie quotidienne » ;
- la simplification et l'allègement en particulier du chapitre « pression et flottaison ».

B. Mise en œuvre

De façon à mettre en œuvre les principes exposés ci-dessus, il a été décidé de procéder à des allègements dans les développements des programmes précédents, chaque fois que ceux-ci ne paraissent pas strictement indispensables, soit à l'exposé des disciplines scientifiques voisines, soit à l'édification logique d'un corpus de connaissances propre à la physique-chimie.

Il apparaît une rubrique nouvelle, intitulée À la découverte de notre environnement, la matière ; elle propose une présentation synthétique des phénomènes physico-chimiques les plus directement accessibles à l'observation. L'introduction de cette rubrique ne constitue pas un alourdissement du programme dans la mesure où, elle regroupe de nombreux éléments déjà présents dans le programme précédent.

Les trois rubriques du programme, intitulées (A) À la découverte de notre environnement, la matière, (B) La lumière et (C) Le courant électrique proposent un ensemble de connaissances qui, tout en mettant à la disposition des autres champs disciplinaires le socle minimal nécessaire à l'élaboration du discours qui leur est propre, fournit les éléments de base indispensables à l'enseignement ultérieur de la physique-chimie.

Afin de faciliter la lecture, une présentation en trois colonnes est proposée, de gauche à droite :

- La colonne *exemples d'activités* présente une liste non obligatoire et non exhaustive d'exemples qui peuvent être exploités en expériences de cours, en travaux pratiques ou en travaux de documentation.
- La colonne, intitulée *contenus-notions* recense les champs de connaissances de physique-chimie concernés. Y sont, de plus, mentionnés en italiques les interactions avec les autres disciplines et les éléments qui font intervenir l'éducation du citoyen et la prise en compte de l'environnement.
- La colonne intitulée *compétences* explicite les éléments disciplinaires du socle minimal.

En ce qui concerne l'environnement, il est à noter que l'idée de conservation de la matière qui sous-tend tout l'exposé de la rubrique (A) est la base indispensable de toute étude rationnelle dans ce domaine.

La présentation retenue n'implique pas une progression obligatoire. Toute liberté est laissée à l'enseignant pour organiser son cours dans l'ordre où il le souhaite.

Les contenus disciplinaires développés ci-après sont accompagnés d'estimations horaires indicatives. Les activités expérimentales sont favorisées par la constitution, chaque fois que possible, de groupes d'effectif réduit (par exemple en formant trois groupes à partir de deux divisions).

B. Compétences transversales

Les compétences constituant le socle minimal ne se résument pas à celles, associées à des contenus et notions identifiés, qui sont répertoriées dans la troisième colonne des tableaux ci-dessous. À l'issue du cycle central des collèges, l'élève doit également être capable de :

- construire un graphique en coordonnées cartésiennes à partir d'une série de données, les échelles étant précisées par le professeur ;
- le graphique étant donné, interpoler une valeur ;
- faire le schéma d'une expérience réalisée ;
- réaliser une expérience décrite par un schéma ;
- faire le schéma, utilisant les symboles normalisés, d'un circuit électrique simple ;
- réaliser un circuit électrique simple à partir de son schéma normalisé ;
- lire un texte simple contenant des données en liaison avec le programme et d'en extraire des informations pertinentes ;
- utiliser la conjonction « donc » de façon pertinente dans des argumentations ;
- une expérience ayant été réalisée sur les indications du professeur, imaginer ou reprendre une argumentation logique permettant de parvenir à une conclusion ;
- un problème scientifique très simple étant formulé, expliquer en quoi un protocole expérimental proposé par le professeur permet de répondre à la question.

D. Autonomie, créativité et responsabilité

Dès l'année de 4^e, l'enseignement de physique-chimie doit permettre d'aider les élèves à acquérir une certaine autonomie qui s'articule autour de deux axes : la créativité et la responsabilité. Il est important que les premières séances de l'année soient consacrées, au travers des activités proposées, à la prise de conscience par les élèves de l'importance de ces objectifs qui seront par ailleurs omniprésents toute l'année.

Ainsi on pourra, par exemple, proposer des activités expérimentales où le respect d'un protocole est essentiel, chacun opérant à son tour au sein d'un groupe restreint sous le regard de ses camarades. D'autres séances mettront l'ac-

cent sur la capacité à imaginer des expériences en fonction d'un objectif et sur celle à s'organiser pour les mener à bien.

Il s'agit de valoriser l'esprit d'initiative, mais aussi l'écoute et le respect des autres au sein d'une équipe.

II **Contenus**

C. Le courant électrique

(durée conseillée 12 heures)

Cette rubrique présente un grand intérêt :

- pour des raisons évidentes d'importance dans la vie courante ;
- pour donner un début de vision unifiée de phénomènes déjà un peu familiers ;
- pour la richesse de l'aspect expérimental. Celui-ci présentera plusieurs composantes :
 - manipulations raisonnées d'appareils de mesure;
 - connaissance pratique des composants et des appareils.

Le travail de schématisation aura un statut différent de celui rencontré en optique : il s'agira ici d'apprendre à pratiquer des représentations codées.

1. Le courant électrique en circuit fermé

Exemples d'activités

Réaliser des circuits en boucle simple avec des piles, des lampes et des interrupteurs, des moteurs.

Contenus-notions

Circulation d'un courant permanent. Rôle du générateur. Fermeture du circuit. Sens conventionnel du courant.

Compétences

Réaliser à partir de leur schéma des circuits comportant des piles, des lampes, des moteurs, des diodes et interrupteurs.

Réaliser des circuits en boucle simple avec des piles, des lampes et des interrupteurs, des moteurs.

Utiliser une diode pour déterminer le sens d'un courant ou imposer une absence de courant. Utiliser une analogie (hydraulique ou mécanique).

Intercaler des échantillons métalliques dans un circuit électrique simple, comparer avec des échantillons d'autres substances.

Analyser les composants d'une lampe en termes d'isolants et de conducteurs.

Réaliser et schématiser des circuits simples comportant notamment des lampes et des diodes électroluminescentes en série et en dérivation.

Circulation d'un courant permanent. Rôle du générateur. Fermeture du circuit. Sens conventionnel du courant.

[Citoyenneté : règles de sécurité électrique]

Conducteurs et isolants.

Dipôle : définition, dipôles en série, en dérivation, illustration dans des cas très simples.

Fil conducteur de connexion : son rôle en série et en dérivation avec d'autres dipôles (court-circuit).

Réaliser à partir de leur schéma des circuits comportant des piles, des lampes, des moteurs, des diodes et interrupteurs.

Savoir que les expériences ne doivent pas être réalisées avec le courant du secteur pour des raisons de sécurité.

Citer des conducteurs et des isolants usuels.

Identifier et être capable de réaliser des montages en série et en dérivation; savoir vérifier les effets des fils conducteurs de connexion.

À ce stade, le courant électrique est présenté de façon purement phénoménologique. L'étude de l'électrisation ainsi que la description microscopique du courant en terme de mouvement de porteurs de charges sont reportées en classe de 3^e.

On associe la double condition de fermeture du circuit et de la présence du générateur à l'existence d'un courant permanent.

Au cours de la réalisation de circuits simples, on pourra commencer à faire réfléchir les élèves sur les problèmes d'adaptabilité. On ne branche pas notamment n'importe quelle lampe sur n'importe quelle pile.

3. L'intensité et la tension en courant continu

Exemples d'activités

Effectuer des prévisions qualitatives sur des circuits avec dipôles en série et en parallèle, ouverts ou fermés.

Mesurer une intensité avec un multimètre numérique.

Mesurer une tension avec un multimètre numérique.

Contenus-notions

Introduction qualitative des concepts d'intensité et de tension.

Intensité : mesure, unité.

Tension : mesure, unité.

Compétences

Identifier les bornes d'une pile, mettre en évidence la tension entre ses bornes en circuit ouvert.

Reconnaître qu'il peut y avoir une tension entre deux points entre lesquels ne passe aucun courant et qu'inversement un dipôle peut être parcouru par un courant sans tension notable entre ses bornes.

Mesurer une intensité. Connaître l'unité d'intensité, le mode de branchement d'un multimètre utilisé en ampèremètre.

Mesurer une tension. Connaître l'unité de tension, le mode de branchement d'un multimètre utilisé en voltmètre.

Vérifier les lois concernant l'intensité :

– unicité dans un circuit en boucle simple;

Vérifier les lois concernant la tension :

– égalité des tensions aux bornes de deux dipôles en dérivation;

– additivité des tensions le long d'un circuit en boucle simple.

Montrer expérimentalement que si l'on change l'ordre des éléments d'un circuit en boucle simple, on ne change aucune des valeurs des grandeurs (tension aux bornes et intensité) qui les concernent.

Montrer de même, qu'en changeant le circuit, par exemple en rajoutant une lampe en série, les valeurs des grandeurs changent, mais les lois demeurent.

Loi de conservation vérifiée par l'intensité en courant continu.

Loi d'additivité vérifiée par la tension.

Le comportement d'un circuit en boucle simple est indépendant de l'ordre des dipôles associés en série qui le constituent.

Caractère universel (indépendant de l'objet) des deux lois précédentes.

Connaître et vérifier la conservation de l'intensité en courant continu.

Connaître et savoir vérifier l'additivité de la tension.

Montrer que le courant qui traverse une pile dépend du circuit sur lequel elle est branchée.

Choisir dans un assortiment de lampes celle que l'on peut alimenter avec une pile donnée.

L'approche des deux grandeurs intensité et tension est opératoire. De façon qualitative, puis quantitative, on amène l'élève à identifier deux grandeurs qui s'opposent par le fait qu'elles obéissent à des lois différentes (conservation pour l'intensité I d'un courant continu, additivité pour la tension U le long d'un circuit série).

L'exposé de ces deux lois n'est pas fait dans le but de donner lieu à des exercices calculatoires mais dans celui de commencer à construire les concepts d'intensité et de tension en montrant comment ces deux grandeurs s'opposent par leur comportement.

Cette opposition se manifeste en particulier dans deux cas extrêmes :

– si U est nul et I différent de zéro (fil de connexion branché dans un circuit et traité comme un dipôle);

– si I est nul et U différent de zéro (interrupteur ouvert, diode en inverse).

La loi de conservation pour l'intensité sera étendue en classe de 3^e aux courants variables (dont l'intensité est fonction du temps). Elle reste une excellente approximation pour des courants de fréquences faibles (en particulier pour le courant du secteur).

Un circuit électrique est un ensemble d'éléments reliés entre eux dont chacun contribue au comportement global du circuit. Dans un circuit en série, l'ordre des éléments n'a pas d'importance.

On notera bien que l'activité de schématisation prend une place tout particulièrement importante dans cette partie du programme : les élèves y manipulent des représentations symboliques codées comme ils l'ont encore peu, sinon jamais, fait.

PHYSIQUE-CHIMIE

Dans la continuité du programme du cycle central, le programme de troisième part de questions que l'élève est susceptible de se poser dans son cadre de vie quotidien et le conduit à élaborer de façon progressive une représentation rationnelle de son environnement.

Il est possible de considérer que la rubrique A (des matériaux au quotidien) constitue la partie "chimie" du programme, et la rubrique B (notre environnement physique) en représentant la partie "physique".

L'unité du programme se caractérise par des objectifs disciplinaires généraux ainsi que par des objectifs transversaux identiques pour la physique et pour la chimie.

Les objectifs de l'enseignement restent ceux qui ont été énoncés dans le programme du cycle central du collège :

1. Il ne se limite pas à former de futurs physiciens et de futurs chimistes mais entend développer chez l'ensemble des élèves des éléments de culture scientifique indispensables dans le monde contemporain.
2. Au travers de la démarche expérimentale, il doit former les esprits à la rigueur, à la méthode scientifique, à la critique et à l'honnêteté intellectuelle. Avec des sujets et des expériences attractifs, il doit susciter la curiosité.
3. L'enseignement de physique-chimie doit former au raisonnement, tant quantitatif que qualitatif. L'étude de la matière et de ses transformations est par excellence le domaine du raisonnement qualitatif où il s'agit moins de savoir utiliser des outils mathématiques que de décoder, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants. Attention, le qualitatif n'est pas une solution de facilité.
4. Il doit être ouvert sur les techniques qui, pour la plupart, ont leur fondement dans la physique et la chimie.
5. Il doit susciter des vocations scientifiques (techniciens, ingénieurs, chercheurs, enseignants...), donc pour cela être motivant et ancré sur l'environnement quotidien et les technologies modernes.
6. Au même titre que les autres disciplines scientifiques, la physique et la chimie interviennent dans les choix politiques, économiques, sociaux, voire éthiques. L'enseignement de physique-chimie doit contribuer à la construction d'un "mode d'emploi de la science et de la technique" afin que les élèves soient préparés à ces choix.
7. L'enseignement doit faire ressortir que la physique et la chimie sont des éléments de culture essentiels en montrant que le monde est intelligible. L'extraordinaire richesse et la complexité de la nature et de la technique peuvent être décrites par un petit nombre de lois universelles constituant une représentation cohérente de l'univers. Dans cet esprit, il doit faire appel à la dimension historique de l'évolution des idées. Il doit également faire une large place aux sciences de l'univers : astronomie et astrophysique.
8. Il doit montrer que cette représentation cohérente est enracinée dans l'expérience : les activités expérimentales ont une place essentielle.
9. L'enseignement fera largement appel aux applications. Il faut que les élèves sachent que grâce aux recherches et aux connaissances fondamentales, des applications techniques essentielles ont vu le jour et que, réciproquement, les applications peuvent motiver la recherche.
10. Il devra former le citoyen-consommateur au bon usage des objets techniques ainsi qu'à celui des produits chimiques qu'il sera amené à utiliser dans la vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.
11. Ancré dans l'environnement quotidien, l'enseignement devra utiliser au mieux les moyens contemporains. L'ordinateur est un outil privilégié pour la saisie et le traitement des données ainsi que pour la simulation. Il ne sera en aucun cas substitué à l'expérience directe, dont il sera le serviteur.

La physique-chimie contribue aussi à l'enseignement du français par la pratique d'activités documentaires, par la rédaction de comptes-rendus et par l'entraînement à une argumentation utilisant un vocabulaire bien défini ; les activités expérimentales, en amenant les élèves à formuler des hypothèses et à les confronter aux faits, développent la pensée logique.

L'unité du programme de troisième se manifeste également dans la nature des concepts théoriques qui sous-tendent les thèmes proposés :

- le concept de *charge électrique* est introduit en A1 à l'occasion de la présentation d'un modèle de l'atome plus élaboré que celui qui a été abordé en quatrième. Ce modèle est aussitôt utilisé pour interpréter la conduction de l'électricité par les métaux et par les solutions, il intervient en A2 pour interpréter les réactions entre les métaux et les solutions acides.

- le programme de troisième introduit le vocabulaire relatif à l'énergie et apprend à l'utiliser à bon escient : ce vocabulaire, rencontré en A2 et A3 à propos de l'énergie produite par les combustions, joue un rôle essentiel en B2 dans la description des appareils électriques usuels et intervient enfin en B3 pour interpréter la formation d'une image en termes de concentration d'énergie. Les connaissances ainsi acquises sont réinvesties et renforcées par leur utilisation en sciences de la vie et de la terre pour l'étude du fonctionnement de l'organisme humain.

Ce programme a été conçu en tenant compte de la progression de l'ensemble des autres disciplines scientifiques. Tout en mettant à la disposition des autres champs disciplinaires le socle minimal nécessaire à l'élaboration du discours qui leur est propre, il fournit les éléments de base indispensables à l'enseignement ultérieur de la physique-chimie.

Les connexions particulièrement nombreuses entre le programme de physique-chimie et le programme de sciences de la vie et de la terre (SVT) rendent souhaitables des échanges entre les enseignants des deux disciplines, à la fois pour assurer une articulation dans le temps des enseignements et pour faire bien prendre conscience aux élèves de l'interaction des savoirs disciplinaires. La partie A3 propose une étude transdisciplinaire des problèmes liés à l'environnement pour laquelle la coordination des enseignants des deux disciplines est indispensable.

Par ailleurs, les besoins de la technologie sont pris en compte, tout particulièrement dans les parties A1 et B2.

Afin de faciliter la lecture du texte du programme, une présentation en trois colonnes est proposée, de gauche à droite :

- la colonne "EXEMPLES D'ACTIVITÉS" présente une liste non obligatoire et non exhaustive d'exemples qui peuvent être exploités en expériences de cours, en travaux pratiques ou en travaux de documentation,
- la colonne "CONTENUS-NOTIONS" recense les champs de connaissances de physique-chimie concernés. Y sont, de plus, mentionnés en italiques les interactions avec les autres disciplines et les éléments qui font intervenir l'éducation du citoyen et la prise en compte de l'environnement.

- la colonne "COMPÉTENCES" explicite les éléments disciplinaires du socle minimal,

La présentation retenue n'implique pas une progression obligatoire. Toute liberté est laissée à l'enseignant pour organiser son cours dans l'ordre où il le souhaite.

Les contenus disciplinaires développés ci-après sont accompagnés d'estimations horaires indicatives. Comme ces estimations permettent de le constater, la longueur du libellé d'une partie du programme n'est pas nécessairement représentative du temps qu'il convient de lui consacrer.

La mise en œuvre des activités expérimentales préconisées par le programme conduit à recommander la constitution, chaque fois que possible, de groupes d'effectif réduit (par exemple en formant 3 groupes à partir de 2 divisions, tout en respectant l'horaire élève).

Les compétences constituant le socle minimal ne se résument pas à celles, associées à des contenus et notions identifiés, qui sont répertoriées dans la troisième colonne des tableaux ci-dessous. A l'issue du collège, l'élève doit également être capable de :

- construire un graphique en coordonnées cartésiennes à partir d'une série de données, les échelles étant précisées par le professeur,
- le graphique étant donné, interpoler une valeur,
- faire le schéma d'une expérience réalisée,
- réaliser une expérience décrite par un schéma,
- faire le schéma, utilisant les symboles normalisés, d'un circuit électrique simple,
- réaliser un circuit électrique simple à partir de son schéma normalisé,
- lire un texte simple contenant des données en liaison avec le programme et d'en extraire des informations pertinentes,
- utiliser la conjonction "donc" de façon pertinente dans des argumentations,
- une expérience ayant été réalisée sur les indications du professeur, imaginer ou reprendre une argumentation logique permettant de parvenir à une conclusion,
- un problème scientifique très simple étant formulé, expliquer en quoi un protocole expérimental proposé par le professeur permet de répondre à la question.

Comme au cycle central, l'enseignement de physique-chimie doit permettre d'aider les élèves à acquérir une certaine autonomie qui s'articule autour de deux axes : la créativité et la responsabilité. Il est important que les premières séances de l'année soient consacrées, au travers des activités proposées, à la prise de conscience par les élèves de l'importance de ces objectifs qui seront par ailleurs omniprésents toute l'année.

Ainsi on pourra, par exemple, proposer des activités expérimentales où le respect d'un protocole est essentiel, chacun opérant à son tour au sein d'un groupe restreint sous le regard de ses camarades. D'autres séances mettront l'accent sur la capacité à imaginer des expériences en fonction d'un objectif et sur celle à s'organiser pour les mener à bien.

Il s'agit de valoriser l'esprit d'initiative, mais aussi l'écoute et le respect des autres au sein d'une équipe.

A - DES MATÉRIAUX AU QUOTIDIEN

A1 - Quelques propriétés des matériaux (durée conseillée 10 h)

A1.1 - Divers matériaux : exemple des emballages (4 h).

Dans un premier temps, l'objectif est de sensibiliser les élèves à la diversité des matériaux de notre environnement quotidien et à la diversité de leurs propriétés. Cette sensibilisation peut être faite avantageusement sous forme de recherches documentaires menées par les élèves, suivies éventuellement d'exposés devant la classe.

Après une brève présentation des matériaux en général, on centrera l'étude sur le thème des emballages de produits alimentaires, en particulier ceux des boissons. Ce thème présente plusieurs avantages :

- les élèves sont intéressés par des objets qu'ils côtoient tous les jours ;
- les matériaux présentent une bonne diversité : verres, plastiques, métaux, cartons, matériaux composites ;
- les élèves sont amenés à prendre en compte l'importance de nombreuses propriétés : qualités mécaniques, physiques, esthétiques, coût, inertie chimique vis-à-vis du contenu, aptitude au recyclage.

- il permet, sur l'exemple des tests de reconnaissance de matériaux, de montrer l'intérêt d'un travail méthodique.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS-NOTIONS	COMPÉTENCES
Qu'est-ce qui distingue les matériaux ? Comment réalise-t-on un tri sélectif ?		
- recherches documentaires sur les emballages de produits alimentaires. - expériences permettant de distinguer et de classer des matériaux.	Distinction entre objet et matériau. Identification des matériaux constituant un objet. Diversité des matériaux. [français, arts plastiques, technologie, histoire, environnement : récupération sélective]	Rassembler une documentation sur un sujet donné et restituer à la classe le résultat d'une petite recherche documentaire. Faire la différence entre objet et matériau. Conduire un test permettant de distinguer des matériaux. Connaître quelques classes de matériaux : verres, métaux, matières plastiques.

Commentaires

On différenciera par des tests quelques matières plastiques usuelles. Un objectif est d'amener les élèves à ne plus parler "du plastique", mais des matières plastiques.

Les métaux utilisés dans le domaine alimentaire sont essentiellement l'aluminium et le fer (en fait, l'acier). Les tests proposés permettent de les différencier. Un objectif important est d'amener les élèves à utiliser un vocabulaire précis, notamment à ne pas utiliser "fer" et "métal" comme des synonymes.

En SVT, le terme matériau est utilisé pour des substances inertes (non vivantes), produites par la nature ou les actions humaines : divers minéraux, le bois, la cellulose... La distinction y est, de plus, souvent faite entre matériaux "naturels" (ceux qui étaient déjà à la disposition de l'homme de Cro Magnon) et matériaux "artificiels", pour lesquels l'implication humaine de transformation est plus ou moins importante. Il est intéressant de noter que, du point de vue de la physique et de la chimie, il n'y a pas de différence entre un matériau présent dans la nature et un matériau produit par l'industrie humaine.

Parmi les nombreux critères de choix d'un matériau pour un usage donné, apparaît le critère de sa réactivité chimique. En particulier, dans le cas d'un emballage alimentaire, une préoccupation essentielle est celle de son absence de réactivité vis-à-vis de l'air extérieur d'une part, de son contenu d'autre part. Cette problématique ne sera pas encore développée en A1 dans la mesure où elle constitue le fil conducteur de la rubrique A2 (comportement chimique des matériaux).

A1.2 - Matériaux et électricité (6 h)

L'existence des atomes étant rappelée aux élèves, une introduction historique doit leur faire prendre conscience que le modèle de l'atome qui leur est présenté est le fruit des efforts de plusieurs générations de scientifiques.

La poursuite de la présentation du modèle de l'atome donné au cycle central conduit à introduire la notion de charge électrique, notion fondamentale à la base aussi bien de l'interprétation des propriétés physiques des matériaux que de leur réactivité chimique.

Un modèle possède une valeur explicative limitée dans un champ d'application déterminé :

- En un premier temps, le programme de quatrième introduit le modèle moléculaire afin d'expliquer les propriétés des liquides, solides et gaz, sans décrire la constitution de la molécule puisque la connaissance de celle-ci ne joue pas encore un rôle déterminant dans l'explication des propriétés décrites.

- Toujours en classe de quatrième, dans un deuxième temps, le modèle précédent est amélioré en présentant la molécule comme constituée d'atomes ce qui permet de donner une interprétation de la réaction chimique sans avoir à décrire la structure interne de l'atome.

- En classe de troisième, on présente l'atome comme constitué d'un noyau entouré d'électrons. La structure de l'atome permet d'abord d'expliquer la conduction du courant électrique dans les métaux et dans les solutions. Plus loin (A2), le concept d'ion permet d'expliquer la réaction des solutions acides avec les métaux.

Le modèle simple proposé ne prétend pas être une représentation définitive de la réalité : l'élève doit savoir qu'il rencontrera dans la suite de ses études des modèles de l'atome plus élaborés, plus "performants" en ce sens qu'il permettent de rendre compte d'un plus grand nombre de faits expérimentaux.

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS-NOTIONS	COMPÉTENCES
Qu'est-ce que le courant électrique dans un métal ou dans une solution ?		
- étude d'un texte historique sur l'atome. - étude de documents (textes, ou documents multimédia) illustrant la structure microscopique de matériaux (métaux, verres, matières plastiques).	Constituants de l'atome : noyau et électrons. Un ion est un atome ou un groupe d'atomes qui a perdu (ion positif) ou gagné (ion négatif) un ou des électrons. [SVT : besoins nutritifs, carences alimentaires]	Connaître les constituants de l'atome : noyau et électrons. Savoir que les atomes sont électriquement neutres. Savoir que les matériaux sont électriquement neutres dans leur état habituel.
- réaliser un circuit électrique. - réaliser une expérience de migration d'ions.	Un premier modèle du courant électrique dans un métal. Passage du courant électrique dans une solution. Sens du déplacement des ions selon le signe de leur charge.	Savoir que, dans un métal, le courant électrique est un déplacement d'électrons dans le sens opposé au sens conventionnel du courant et qu'il est dû à un déplacement d'ions dans une solution.

Commentaires

Il n'est pas demandé de donner la composition du noyau. Ce qui importe est de faire mémoriser des caractéristiques de l'atome que l'étude de modèles plus élaborés ne remettra pas en cause :

- la charge positive de l'atome et sa masse sont concentrées au centre de celui-ci dans une région appelée noyau ;
- la charge négative est répartie dans le cortège électronique qui entoure le noyau ;
- les dimensions de l'atome sont de l'ordre du dixième de nanomètre ;
- les dimensions du noyau sont environ 100 000 fois inférieures. (1)

La signification des mots "anion" et "cation" pourra être donnée si l'occasion incite à le faire (lecture d'une étiquette d'eau minérale par exemple) mais elle n'a pas à être connue des élèves.

(1) Les dimensions citées sont de simples ordres de grandeur, à une puissance de dix près. Elles dépendent bien entendu de la nature de l'atome considéré

132.

B2 - Électricité et vie quotidienne (durée conseillée : 16 h)

L'électricité est présente dans la plupart des actes quotidiens. Son utilisation demande de respecter impérativement des règles de sécurité. Celles-ci ne peuvent être maîtrisées qu'après une analyse rationnelle des éléments qui constituent une installation électrique. Après avoir pris conscience du rôle des résistances, l'élève comprendra à partir d'expérimentations ce qu'est une tension alternative, comment on l'obtient et comment on peut la transformer pour la transporter ou l'adapter pour alimenter différents appareils. Il sera amené ensuite à prendre conscience de l'aspect énergétique d'une installation domestique.

B2.1 - Notion de résistance (4h)

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS-NOTIONS	COMPÉTENCES
Quelle est l'influence d'une résistance dans un circuit électrique ?		
- introduire dans un circuit simple des "résistances" de valeurs différentes et mesurer les intensités. - soumettre à une même tension des "résistances" de valeurs différentes et mesurer les intensités.	Notion de résistance électrique Unité.	Savoir que l'intensité du courant dans un circuit est d'autant plus faible que la résistance du circuit est plus élevée. L'ohm (W), unité de résistance du SI.
Comment varie l'intensité dans une résistance quand on augmente la tension appliquée ?		
- construire point par point, puis acquérir éventuellement à l'ordinateur la caractéristique d'un dipôle. - comparer la valeur de la résistance mesurée à l'ohmmètre à la pente de la caractéristique.	Caractéristique d'un dipôle. Loi d'Ohm. [Mathématiques : proportionnalité, équation d'une droite]	Schématiser un montage permettant de tracer une caractéristique. Évaluer l'intensité dans un circuit connaissant la valeur de la résistance et celle de la tension appliquée à ses bornes...
Tous les matériaux ont-ils les mêmes propriétés de résistance ?		
- mesurer la résistance de divers fils métalliques. - noter l'influence qualitative des paramètres géométriques (longueur, section).	Qualités conductrices des matériaux. Fusibles.	Savoir que tous les matériaux n'ont pas les mêmes propriétés conductrices d'où un choix selon l'utilisation souhaitée.

Commentaires

Les notions de circuit, de tension, d'intensité et de dipôle ont été introduites au cycle central. L'étude est maintenant prolongée par la mise en évidence d'un lien simple courant-tension pour un dipôle particulier déjà rencontré à l'occasion des montages effectués en technologie. Le concept de résistance permet de préciser les comparaisons entre les propriétés de conduction des matériaux qui ont été présentées de façon qualitative en A1.2.

La notion de résistivité est hors programme de même que l'étude des associations de résistances.

L'expérimentation sera d'abord effectuée en continu mais on notera ultérieurement que la loi d'Ohm reste valable en alternatif, tant pour les valeurs instantanées que pour les valeurs efficaces.

Un dipôle est dit ohmique si sa caractéristique est de la forme $U=RI$, R étant un paramètre qui caractérise le dipôle dans des conditions physiques déterminées. La résistance R est en particulier fonction de la température, ce qui explique que l'on n'obtienne pas une caractéristique rectiligne si l'on soumet un dipôle ohmique à des tensions qui engendrent un échauffement non négligeable, cet effet étant particulièrement sensible dans le cas du filament d'une lampe.

La mise en œuvre d'un fusible est une première occasion de constater la conversion d'énergie électrique sous forme thermique (effet Joule).

B2.2 Le "courant alternatif" (6h)

Volontairement l'expression utilisée comme titre de cette rubrique est celle qui est employée dans la vie courante. Cependant compte tenu de l'objet d'étude, le terme scientifiquement approprié est "tension alternative".

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS-NOTIONS	COMPÉTENCES
Qu'est-ce qui distingue la tension fournie par le "secteur" de celle fournie par une pile ?		
- comparer les effets d'une tension alternative à ceux d'une tension continue en utilisant un générateur TBF, une diode DEL, un moteur - relever la tension manuellement et à l'ordinateur.	Tension continue et tension variable au cours du temps. Intensité continue et intensité variable au cours du temps.	Identifier une tension continue, une tension alternative. Réaliser un tableau de mesures pour une grandeur physique variant en fonction du temps.
- représenter graphiquement les variations d'une tension alternative en fonction du temps.	Tension alternative périodique. Valeurs maximum et minimum. "Motif élémentaire". Période T définie comme la durée du motif.	Construire une représentation graphique de l'évolution d'une grandeur. Reconnaître une grandeur alternative périodique. Déterminer graphiquement sa valeur maximum et sa période.
Que signifient les courbes affichées par un oscilloscope ?		
- utiliser un oscilloscope sans balayage, puis avec balayage.	Signification d'un oscillogramme.	Montrer à l'oscilloscope la variation d'une tension au cours du temps.
- effectuer des déterminations de tension maximum, de période et de fréquence à l'oscilloscope.	Fréquence f définie comme le nombre de motifs par seconde. Relation $f = 1/T$.	Reconnaître à l'oscilloscope une tension alternative. Mesurer sa valeur maximum, sa période et sa fréquence. Le hertz (Hz), unité de fréquence du Système International (SI).
Que signifie l'indication d'un voltmètre utilisé en position "alternatif" ?		
- avec des tensions alternatives d'amplitudes différentes mesurer la valeur maximale U_{\max} à l'oscilloscope et lire l'indication U d'un voltmètre alternatif, calculer le rapport $A = U_{\max}/U$	Pour une tension sinusoïdale, un voltmètre alternatif indique la valeur efficace de cette tension. Cette valeur efficace est proportionnelle à la valeur maximum.	Savoir que les valeurs des tensions alternatives indiquées sur les alimentations ou sur les récepteurs usuels sont des valeurs efficaces. Déterminer la valeur maximum d'une tension sinusoïdale à partir de sa valeur efficace.
Comment est produite une tension alternative telle que celle du secteur ?		
- déplacer un aimant près d'une bobine. - visite d'une installation de production d'électricité.	Le déplacement d'un aimant au voisinage d'un circuit conducteur permet d'obtenir une tension variable dans le temps.	Produire une tension par déplacement d'un aimant. Connaître le principe de la production de tensions alternatives.
Comment une alimentation branchée sur le secteur peut-elle jouer le même rôle qu'une pile ?		
- utiliser un transformateur de rapport modéré avec une très basse tension et dans les deux sens. - étude documentaire sur le transport et la distribution de l'électricité. - visualiser la tension à la sortie d'un dispositif redresseur.	Le transformateur ne fonctionne qu'en alternatif, sans modifier la fréquence. Rôle et emplois d'un transformateur. Sécurité. Existence de dispositifs redresseurs.	Citer quelques emplois des transformateurs. Identifier une tension redressée.

Commentaires

On désigne par courant alternatif un courant variable dont le sens s'inverse au cours du temps. On utilise en pratique des courants alternatifs périodiques et le plus souvent sinusoïdaux.
Toute manipulation directe sur le secteur est interdite ; pour toute visualisation le concernant, il convient d'utiliser des transformateurs protégés.
On pourra montrer les oscillogrammes de tensions alternatives non sinusoïdales, par exemple celle engendrée par un alternateur de bicyclette.
La relation $U = U_{\max}/A$ ($A \geq 1$) sera étudiée expérimentalement et explicitée sous la forme $A = \sqrt{2}$ seulement pour une tension de même forme que celle du secteur (tension dite sinusoïdale).

B2.3 Installations électriques domestiques (durée conseillée : 6h)

EXEMPLES D'ACTIVITÉS	CONTENUS-NOTIONS	COMPÉTENCES
Quelles sont les caractéristiques des prises du secteur (à deux ou trois bornes) ?		
- mesurer la tension entre les différentes bornes (manipulation professeur). - étude (texte ou document multimédia) des dangers du courant électrique.	Distinction entre le neutre et la phase. Valeur efficace et fréquence de la tension du secteur. Risques d'électrocution, entre la phase et le neutre et entre la phase et la terre.	Distinction entre neutre et phase. Valeur efficace et fréquence du secteur. Être conscient des risques d'électrocution présentés par une installation domestique.
Comment sont constitués les circuits électriques utilisés à la maison ?		
- étude d'une installation domestique sur document ou sur maquette. - réaliser un montage basse tension de lampes en dérivation. Mettre progressivement les lampes en circuit et observer la variation d'intensité dans le circuit principal.	Montage en dérivation. L'intensité dans le circuit principal d'un montage en dérivation augmente avec le nombre de récepteurs en dérivation.	Les installations domestiques sont réalisées en dérivation. Mettre en évidence en basse tension que lorsqu'on augmente le nombre de récepteurs, l'intensité traversant le circuit principal augmente.
- observer le rôle des conducteurs et des isolants dans une installation.	Spécificité des matériaux employés dans une installation électrique.	Identifier une mauvaise isolation et une cause de court-circuit.
- étudier sur une maquette en très basse tension le rôle de la prise de terre et du disjoncteur différentiel.	La mise à la terre du châssis protège de certains risques électriques.	Savoir qu'il est indispensable que le châssis métallique de certains appareils soit relié à la terre.
Que signifie la valeur exprimée en watts (W) qui est indiqué sur chaque appareil électrique ?		
- comparer les ordres de grandeur des puissances nominales inscrites sur divers appareils domestiques.	La puissance (dite nominale) indiquée sur un appareil est la quantité d'énergie électrique qu'il transforme chaque seconde dans ses conditions normales d'utilisation.	Le watt (W), unité de puissance du SI. Quelques ordres de grandeurs de puissances électriques. Évaluer l'intensité efficace traversant un appareil alimenté par le secteur à partir de sa puissance nominale. (1)
À quoi correspond une facture d'électricité ?		
- rechercher sur la facture familiale la "puissance souscrite" et identifier les appareils qui pourront fonctionner simultanément.	L'intensité qui parcourt un fil conducteurs ne doit pas dépasser une valeur déterminée par un critère de sécurité.	Connaître le rôle d'un coupe-circuit.
- lire les indications d'un compteur d'énergie électrique. - recherche documentaire : tarifs spéciaux EDF.	L'énergie électrique transformée pendant une durée t par un appareil de puissance constante P est égale au produit $E = t P$. [Mathématiques : grandeur produit]	Être capable de calculer l'énergie électrique transformée par un appareil pendant une durée donnée et de l'exprimer dans l'unité du SI, le joule (J) ainsi qu'en kilowatt-heures (kWh)

(1) Le commentaire ci-dessous précise les conditions de cette évaluation.

Commentaires

On commence dans cette rubrique à donner une signification quantitative au concept d'énergie en mentionnant l'unité d'énergie et en reliant l'énergie électrique à d'autres grandeurs physiques. On peut noter que l'unité d'énergie est également mentionnée à propos de la valeur énergétique des aliments.

Dans le langage courant, on parle de "consommation d'énergie" et même de "consommation d'électricité". Les observations effectuées permettront d'expliquer que l'énergie ne disparaît pas mais est transformée et l'on mentionnera la nature de cette transformation. En courant continu, la puissance électrique transformée est égale au produit UI . En courant alternatif, elle est égale à $k UI$ (valeurs efficaces) avec $k \leq 1$, $k=1$ correspond au cas d'un appareil purement résistif, ne produisant que des effets thermiques. Le nom du coefficient k (facteur de puissance) n'a pas à être mentionné.

On se limitera donc en fait à utiliser l'expression $P=UI$, en veillant toutefois à préciser que celle-ci n'est valable strictement que pour un appareil dont les effets sont purement thermiques et qu'elle est une bonne approximation pour de nombreux appareils domestiques. On est ainsi capable d'évaluer l'intensité efficace qui traverse un appareil branché sur le secteur à partir de sa puissance nominale : $I \approx P/230$.

La loi de conservation pour l'intensité étudiée en quatrième s'étend aux courants variables (dont l'intensité est fonction du temps). Elle reste une excellente approximation pour les valeurs instantanées des courants de fréquences faibles (en particulier pour le courant du secteur). En revanche, de même que la loi d'additivité des tensions, elle n'est valable pour les grandeurs efficaces que dans des circuits résistifs. Le professeur n'aura pas à rentrer dans ces considérations dans la mesure où tout calcul relatif à la répartition des tensions et des intensités dans un réseau électrique est exclu au niveau du collège. On tire toutefois une conclusion pratique importante des remarques précédentes si on note que, l'énergie consommée dans une installation domestique l'étant principalement sous forme thermique, il est possible d'effectuer une approximation qui confond les divers appareils avec des résistances. Cette approximation permet d'estimer l'intensité du circuit principal à partir des puissances nominales P des divers appareils : l'intensité efficace traversant chaque appareil est donnée par la relation $I \approx P/U$ et celle dans le circuit principal est voisine de la somme des intensités en dérivation. En ce qui concerne une installation domestique, la conclusion est que l'on obtient une estimation de l'intensité du circuit principal en effectuant le quotient par 230 de la puissance totale de l'installation.

La relation $E = tP$ constitue à ce niveau une définition, elle ne fera donc pas l'objet d'une vérification expérimentale.

ANNEXE II

QUESTIONNAIRES AVANT ENSEIGNEMENT

Texte introductif aux questionnaires

Le questionnaire qui va suivre n'est pas un contrôle, ni une interrogation, ni un examen. Il est d'ailleurs anonyme.

Il s'agit simplement d'une enquête visant à mieux connaître les difficultés rencontrées par les élèves et les étudiants lorsqu'on leur enseigne l'électricité.

Nous demandons votre collaboration à cette étude.

Répondez aux questions le plus spontanément possible sans vous soucier de l'état de vos connaissances. C'est ce que vous pensez qui nous intéresse, pas vos connaissances scolaires.

Prenez votre temps pour répondre, il ne vous est pas limité.

Si une question vous paraît évidente ou faisant double emploi, signalez-le et ne vous en tracassez pas.

Pour chacune des questions qui vont vous être posées, vous pouvez vous expliquer par un dessin ou indiquer tout ce que vous voulez sur le dessin existant.

Si après avoir répondu à une question, vous changez d'avis, barrez votre première réponse, mais ne l'effacez pas. Elle nous intéresse aussi.

Pour chacune des questions, expliquez bien « **pourquoi** », **c'est plus important que de répondre à la question.**

S'il vous semble qu'il vous manque des renseignements pour répondre à l'une ou l'autre question, indiquez lesquels.

Si vous ne pouvez répondre à l'une ou l'autre question, indiquez simplement « je ne sais pas ».

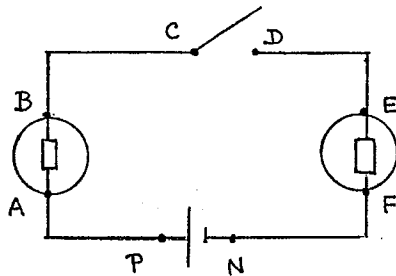
Bon travail et merci.

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

Rentrée 96
1^o classe

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

QUESTION I



Ce schéma représente un circuit électrique constitué d'une pile PN reliée par des fils à deux ampoules identiques et un interrupteur CD.

A / 1 - La pile est-elle traversée par quelque chose ?

OUI / NON / Je ne sais pas

Explique, le plus clairement possible, comment tu imagines ce qui se passe à l'intérieur de la pile :

2 - On peut découper ce circuit en tronçons PN / PA / AB / BC / CD / DE / EF / FN .

a - Entourer les tronçons où il circule quelque chose. Les nommer :

b - Explique l'existence d'une circulation dans les tronçons précédents :

3 - Y a-t-il des portions de ce circuit où il ne circule rien ?

a - Nomme les tronçons où il ne circule rien :

b - Explique l'absence de circulation dans les tronçons précédents :

4 - a - L'ampoule AB éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Explique maintenant pourquoi :

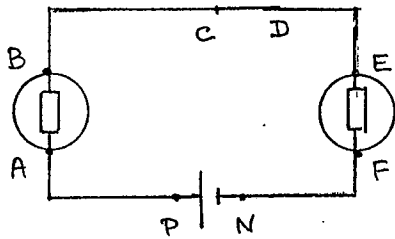
b - L'ampoule EF éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Pourquoi :

c - Si elles éclairent toutes deux comparer leur éclairement :

AB éclaire plus / pareil / moins que EF car...

QUESTION II



Ce schéma représente un circuit électrique constitué d'une pile PN reliée par des fils à deux ampoules identiques et un interrupteur CD.

B / 1 - La pile est-elle traversée par quelque chose ?

... OUI / NON / Je ne sais pas

Explique, le plus clairement possible, comment tu imagines ce qui se passe à l'intérieur de la pile :

2 - On peut découper ce circuit en tronçons PN / PA / AB / BC / CD / DE / EF / FN .

a - Entourer les tronçons où il circule quelque chose. Les nommer :

b - Explique l'existence d'une circulation dans les tronçons précédents :

3 - Y a-t-il des portions de ce circuit où il ne circule rien ?

a - Nomme les tronçons où il ne circule rien :

b - Explique l'absence de circulation dans les tronçons précédents :

4 - a - L'ampoule AB éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Explique maintenant pourquoi :

b - L'ampoule EF éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Pourquoi :

c - Si elles éclairent toutes deux comparer leur éclairement :

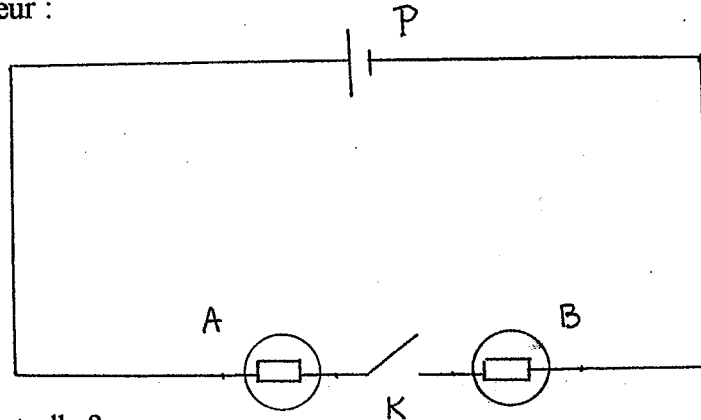
AB éclaire plus / pareil / moins que EF car...

QUESTION III

Soient - P une pile neuve

- A et B deux ampoules adaptées à cette pile

- K un interrupteur :



1° L' ampoule A éclaire-t-elle ?

a) oui / non / je ne sais pas

b) pourquoi ?

2° L' ampoule B éclaire-t-elle ?

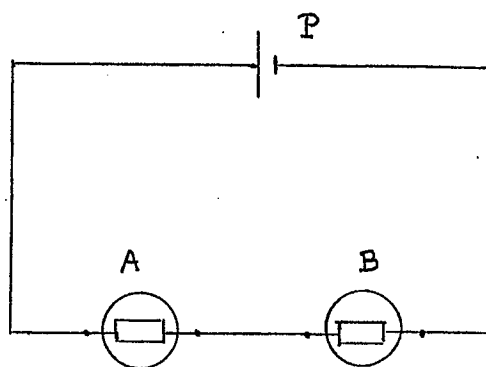
a) oui / non / je ne sais pas

b) pourquoi ?

QUESTION IV

Dans le circuit (a) :

circuit (b) :



on observe l' éclairement des ampoules A et B puis on place un fil aux bornes de B :

1° Faire le schéma du nouveau circuit (b) .

2° L' ampoule B éclaire :

- plus qu' avant / - moins qu' avant / - pareil

- Pourquoi ?

3° L' ampoule A éclaire :

- plus qu' avant / - moins qu' avant / - pareil

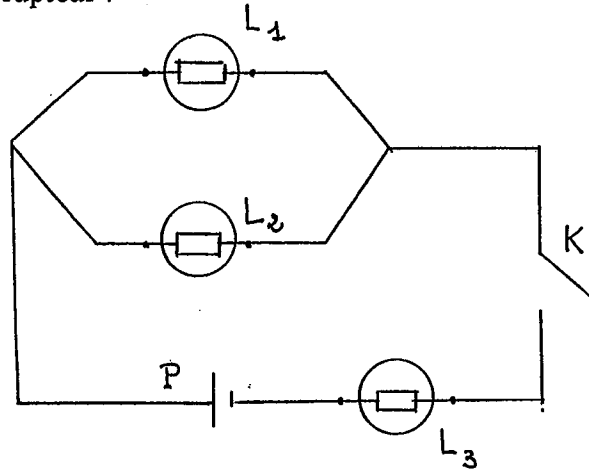
- Pourquoi ?

QUESTION V

Soient - P une pile

- L 1 , L 2 , L 3 trois ampoules identiques adaptées à la pile

- K un interrupteur :



1° Dans ce circuit, un courant circule-t-il ?

a) oui / non / je ne sais pas

b) Pourquoi ?

2° Si un courant circule, *flèche* et *colorier* tous les segments qu'il traverse.

3° On ferme l' interrupteur K . Ces trois ampoules identiques brillent- elles avec la même intensité?

a) oui / non / je ne sais pas

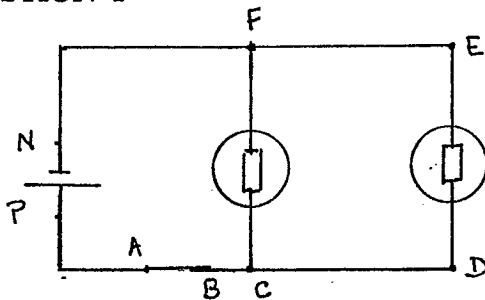
b) Pourquoi : explique les différences éventuelles d' éclairage que tu prévois :

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

Reprise 96
3^e classe

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

QUESTION I



Ce schéma représente un circuit électrique constitué d'une pile PN reliée par des fils à deux ampoules identiques et un interrupteur AB.

A / 1 a - La pile est-elle traversée par quelque chose ?

OUI / NON / Je ne sais pas

Explique, le plus clairement possible, comment tu imagines ce qui se passe à l'intérieur de la pile :

2 - On peut découper ce circuit en tronçons PN / PA / AB / BC / CD / DE / EF / CF / FN .

a - Entourer les tronçons où il circule quelque chose. Les nommer :

b - Explique l'existence d'une circulation dans les tronçons précédents :

3 - Y a-t-il des portions de ce circuit où il ne circule rien ?

a - Nomme les tronçons où il ne circule rien :

b - Explique l'absence de circulation dans les tronçons précédents :

4 - a - L'ampoule CF éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Explique maintenant pourquoi :

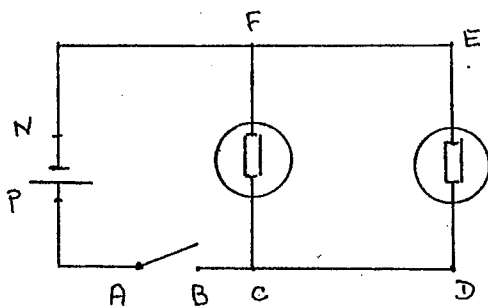
b - L'ampoule DE éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Pourquoi :

c - Si elles éclairent toutes deux comparer leur éclairement :

CF éclaire plus / pareil / moins que DE car...

QUESTION II



Ce schéma représente un circuit électrique constitué d'une pile PN reliée par des fils à deux ampoules identiques et un interrupteur AB.

B / 1 - La pile est-elle traversée par quelque chose ?

OUI / NON / Je ne sais pas

Explique, le plus clairement possible, comment tu imagines ce qui se passe à l'intérieur de la pile :

2 - On peut découper ce circuit en tronçons PN / PA / AB / BC / CD / DE / EF / CF / FN .

a - Entourer les tronçons où il circule quelque chose. Les nommer :

b - Explique l'existence d'une circulation dans les tronçons précédents :

3 - Y a-t-il des portions de ce circuit où il ne circule rien ?

a - Nomme les tronçons où il ne circule rien :

b - Explique l'absence de circulation dans les tronçons précédents :

4 - a - L'ampoule CF éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Explique maintenant pourquoi :

b - L'ampoule DE éclaire-t-elle : oui / non / je ne sais pas

Pourquoi :

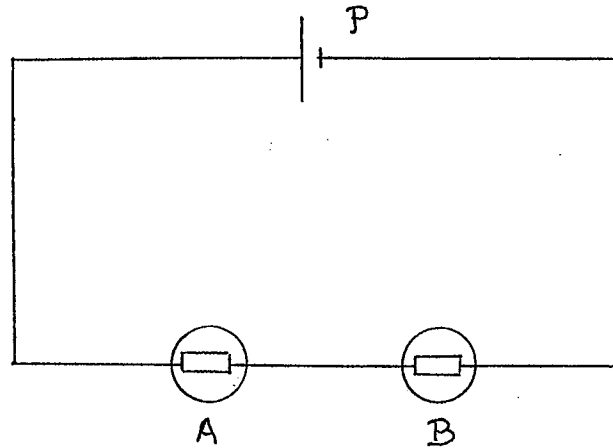
c - Si elles éclairent toutes deux comparer leur éclairement :

CF éclaire plus / pareil / moins que DE car...

QUESTION III

Soient - P une pile neuve

- A et B deux ampoules adaptées à cette pile :



1° Ces deux ampoules sont identiques. Vont-elles briller autant, ou bien y en a-t-il une qui brillera plus que l'autre ?

a) A et B brilleront pareil / A brillera plus que B / B brillera plus que A

b) Pourquoi ?

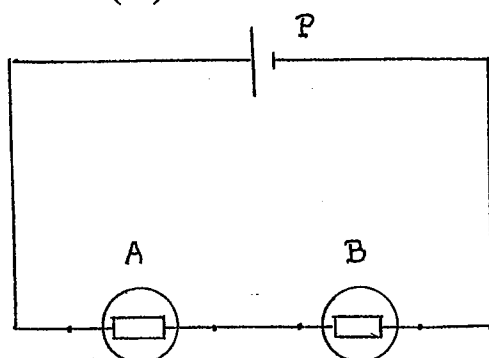
2° A brillera-t-elle pareil que si elle était seule dans le circuit (comme à la question I) ?

a) A brillera pareil / A brillera plus / A brillera moins

b) Pourquoi ?

QUESTION IV

Dans le circuit (a) :



circuit (b) :

on observe l' éclairement des ampoules A et B puis on dévisse l' ampoule B :

1° Faire le schéma du nouveau circuit (b) .

2° L' ampoule B éclaire-t-elle ? :

- oui / - non / - je ne sais pas

- si elle éclaire est-ce plus , moins , ou pareil qu' avant ?

- explique tes réponses :

3° L' ampoule A éclaire -t-elle ? :

- oui / - non / - je ne sais pas

- si elle éclaire est-ce plus , moins ou pareil qu' avant ?

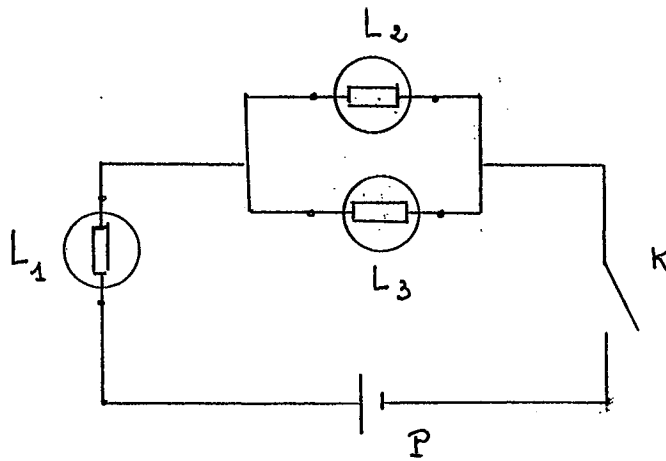
- explique tes réponses :

QUESTION V

Soient - P une pile

- L 1 , L 2 , L 3 trois ampoules identiques adaptées à la pile

- K un interrupteur :



1° Dans ce circuit, un courant circule-t-il ?

a) oui / non / je ne sais pas

b) Pourquoi ?

2° Si un courant circule, *flèche* et *colorier* tous les segments qu' il traverse.

3° On ferme l' interrupteur K . Ces trois ampoules identiques brillent- elles avec la même intensité?

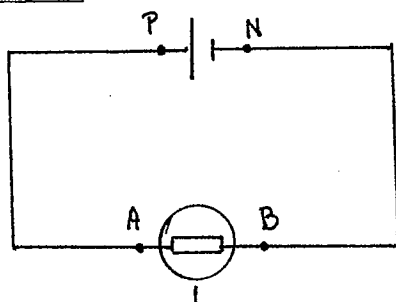
a) oui / non / je ne sais pas

b) Pourquoi : explique les différences éventuelles d' éclairement que tu prévois :

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

QUESTION I



Ce schéma représente un circuit électrique formé d'une pile PN reliée par deux fils à une ampoule L.

Mais en fait, circule-t-il quelque chose, quelque part dans ce circuit ? :

1° Si tu penses qu'il **circule quelque chose** :

a) *colorie* tout ce qui est traversé par ce qui circule.

b) indique par une ou plusieurs *flèches* sur chaque tronçon le sens de ce qui circule et complète le tableau :

tronçon	traversé	sens
PA	oui / non	de vers
AB	oui / non	de vers
BN	oui / non	de vers
NP	oui / non	de vers

2° Si tu penses qu'il **ne circule rien** :

a) rien nulle part, explique le fonctionnement de ce circuit :

b) rien dans un tronçon, explique pourquoi :

3° Si tu penses qu'il **circule quelque chose**, comment t'imagines-tu ce qui circule :

a) peux-tu dire ce que c'est :

b) saurais-tu le comparer à quelque chose :

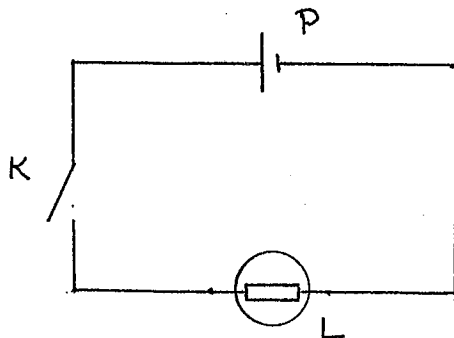
c) comment se fait-il que cela circule :

d) que se passe-t-il dans l'ampoule :

e) que se passe-t-il dans la pile :

QUESTION II

- Soient
- P une pile neuve
 - L une ampoule adaptée à cette pile
 - K un interrupteur :



1° L' ampoule éclaire t-elle ?

- a) oui / non / je ne sais pas
(rayer les réponses fausses , entourer la réponse exacte)

b) pourquoi ?

2° Circule-t-il quelque chose entre deux points de ce circuit ?

- a) oui : précise entre lesquels :
non /
je ne sais pas .

b) pourquoi ?

3° La pile est- elle traversée par quelque chose ?

- a) oui / non / je ne sais pas .

b) pourquoi ?

4° La pile contient- elle quelque chose ?

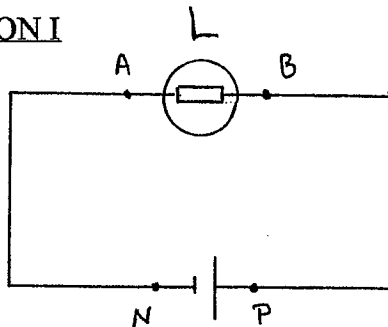
- a) oui / non / je ne sais pas .

b) si oui, **quoi** ?

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

QUESTION I



Ce schéma représente un circuit électrique formé d'une pile PN reliée par deux fils à une ampoule L.

Mais en fait, circule-t-il quelque chose, quelque part dans ce circuit ?

1° Si tu penses qu'il circule quelque chose :

a) *colorie* tout ce qui est traversé par ce qui circule.

b) indique par une ou plusieurs *flèches* sur chaque tronçon le sens de ce qui circule et complète le tableau :

tronçon	traversé	sens	
AN	oui / non	de	vers
NP	oui / non	de	vers
PB	oui / non	de	vers
BA	oui / non	de	vers

2° Si tu penses qu'il ne circule rien :

a) rien nulle part, explique le fonctionnement de ce circuit :

b) rien dans un tronçon, explique pourquoi :

3° Si tu penses qu'il circule quelque chose, comment t'imagines-tu ce qui circule :

a) peux-tu dire ce que c'est :

b) saurais-tu le comparer à quelque chose :

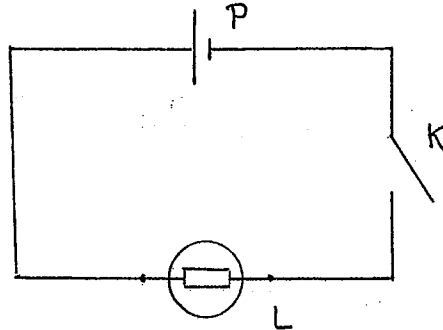
c) comment se fait-il que cela circule :

d) que se passe-t-il dans l'ampoule :

e) que se passe-t-il dans la pile :

QUESTION II

- Soient
- P une pile neuve
 - L une ampoule adaptée à cette pile
 - K un interrupteur :



1° L' ampoule éclaire t-elle ?

- a) oui / non / je ne sais pas
(rayer les réponses fausses , entourer la réponse exacte)

b) pourquoi ?

2° Circule-t-il quelque chose entre deux points de ce circuit ?

- a) oui : - précise entre lesquels :
non /
je ne sais pas .

b) pourquoi ?

3° La pile est- elle traversée par quelque chose ?

- a) oui / non / je ne sais pas .

b) pourquoi ?

4° La pile contient- elle quelque chose ?

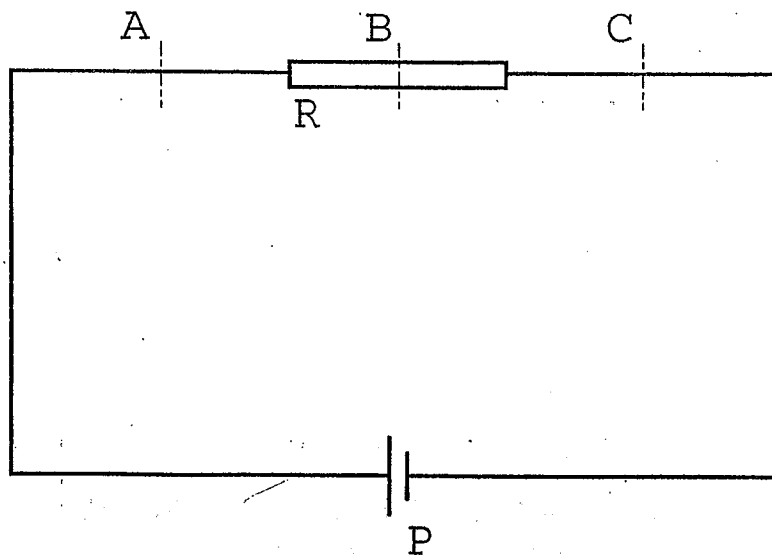
- a) oui / non / je ne sais pas .

b) si oui, quoi ?

ANNEXE III

Questionnaire emprunté à

J.L. CLOSSET

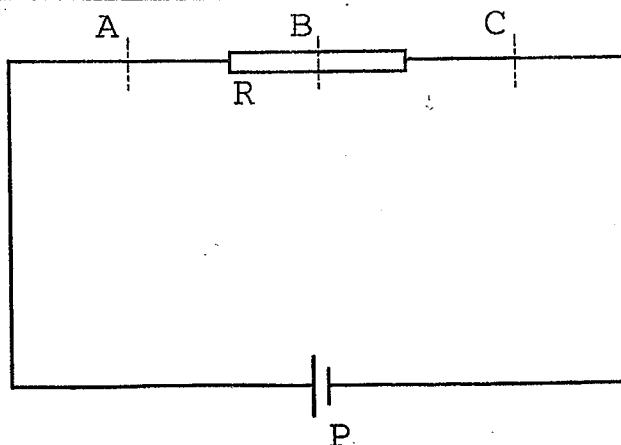


SCHEMA 1

Dans le circuit électrique ci-dessus, P est une pile et R est une résistance.

Q1/a, b, c Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en B
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en C
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en C

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

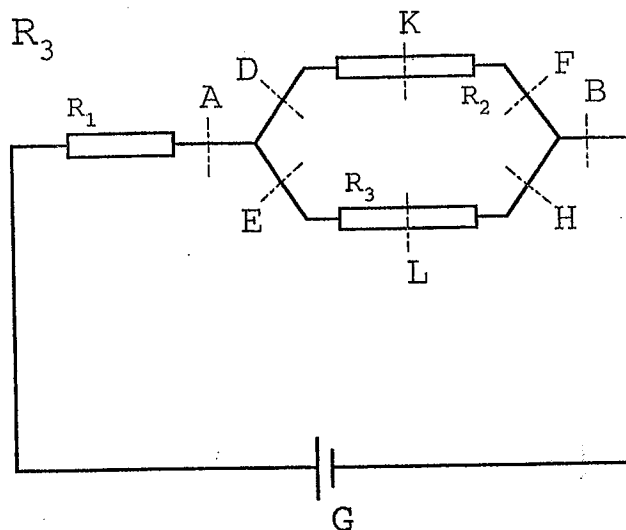


SCHEMA 2 : dans le même circuit que celui de la question précédente, par un procédé quelconque, on augmente la valeur de R

Q2 a, b, c Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en A dans le premier cas
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en B dans le premier cas
L'intensité de courant en C est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en C dans le premier cas

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

$$R_2 > R_3$$



SCHEMA 3 :

Dans le circuit ci-dessus, G est une pile. R1, R2 et R3 sont des résistances; R2 est une résistance de valeur plus importante que R3

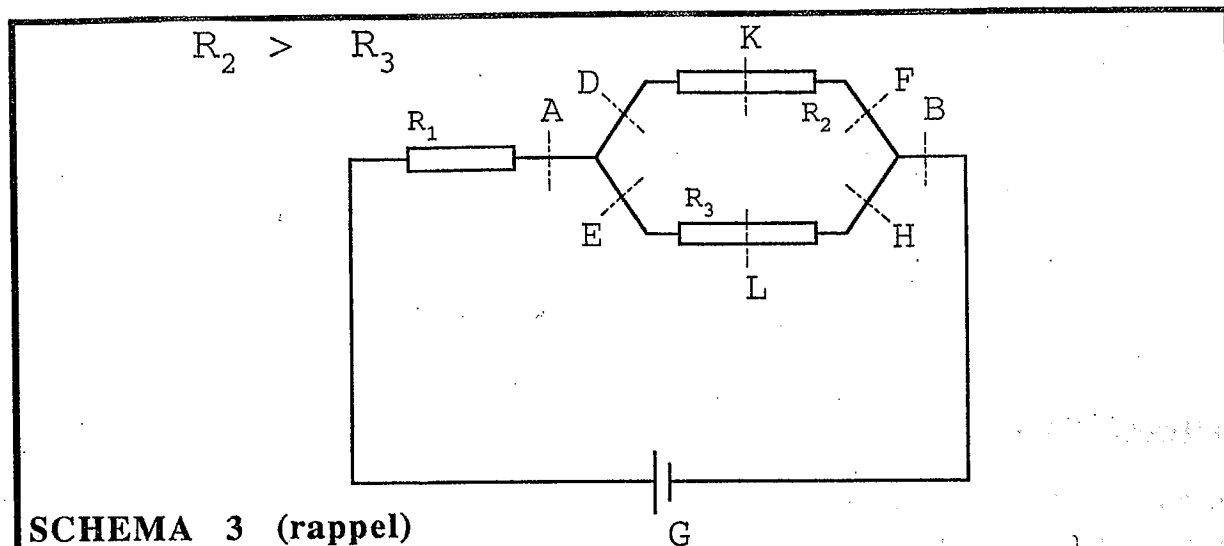
Q3/a,b,c,d

Cochez la réponse correcte

L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en D
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en F
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Attention : ceci est la suite de la question précédente : le schéma est un simple rappel



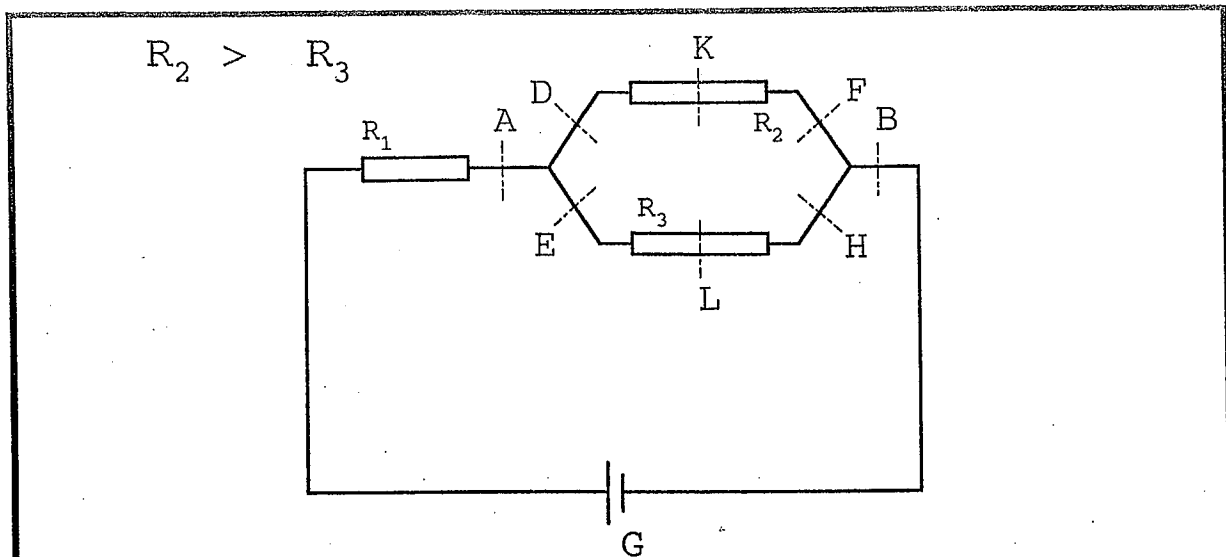
SCHEMA 3 (rappel)

Dans le circuit ci-dessus, G est une pile. R1, R2 et R3 sont des résistances; R2 est une résistance de valeur plus importante que R3

Suite de la question 3 (même circuit)

Q3/ e, f, g Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en D est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E
L'intensité de courant en K est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en L
L'intensité de courant en F est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

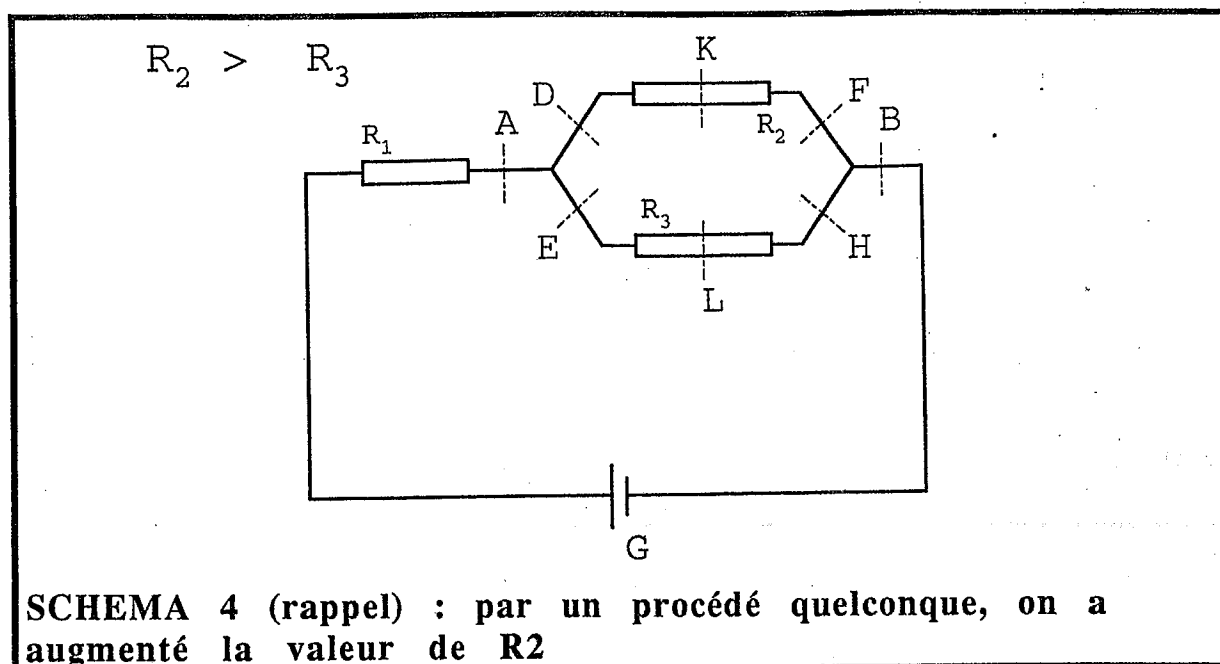


SCHEMA 4 : par un procédé quelconque, dans le circuit précédant, on augmente la valeur de R_2

Q4/a, b, c, d Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en A auparavant
L'intensité de courant en D est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en D auparavant
L'intensité de courant en K est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en K auparavant
L'intensité de courant en F est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en F auparavant

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Attention : ceci est la suite de la question précédente : le schéma est un simple rappel



Suite de la question 4 (même circuit)

Q4/e, f, g, h Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en E est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E auparavant
L'intensité de courant en L est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en L auparavant
L'intensité de courant en H est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H auparavant
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en B auparavant

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

ANNEXE IV

Dossier envoyé aux enseignants volontaires pour enseigner la séquence

Introduction

destinée aux professeurs
acceptant de tester la séquence avec leurs élèves

I / Observations et études à l'origine de cette séquence

Cette séquence est une étape d'un *travail de recherche* sur l'enseignement de l'électricité. Il prend appui sur des travaux antérieurs complétés d'observations personnelles qui aboutissent à des *hypothèses* visant à faire progresser les connaissances de base de l'électrocinétique : $I / U / R$. La séquence est l'occasion de *tester ces hypothèses en situation de classe*, c'est pourquoi votre aide est précieuse et je vous en remercie.

1 - Justification par rapport à l'enseignement usuel

Enseignant, n'avez-vous pas, comme moi été confronté aux difficultés d'apprentissage des sciences physiques (quelque soit le niveau d'enseignement ...) et plus particulièrement de l'électricité ?

J'ai personnellement été confortée dans mes observations par les résultats de recherche en électrocinétique décrivant :

- la **diversité des représentations** développées par les élèves, et leur forte adhérence qui perdure au niveau universitaire
- et l'**absence** quasi totale de **conceptualisation** : $I / U / R$ ne représente généralement rien pour un élève de première : certains n'ayant même pas une ébauche de modèle circulaire.

Ce constat entre en raisonnement avec le contenu des **programmes et manuels**, "listes de notions organisées autour de **lois fondamentales**" à **mémoriser, pas à comprendre**. "Ils reposent sur la croyance que l'**observation** et la **mesure** sont à la base de la mise en évidence de lois physiques", mais "l'acte de mesure ne suffit pas à **donner du sens** à la grandeur mesurée, n'aide pas à la **construction du concept**" : il reste donc à concevoir une autre exploitation des expériences.

En effet, l'élève qui entre en seconde possède une certaine habileté expérimentale sur laquelle nous nous appuyons et qui sera enrichie..., mais "il confond U et I ", n'en possède pas de représentation : ces concepts ne sont pour lui d'aucune utilité.

Le but de la séquence est donc d'amener progressivement l'élève à l'acquisition des concepts, des lois physiques et de leur utilisation. (principe directeur pour la classe de 4^o....) c'est à dire à se construire une représentation intelligible du monde qui l'entoure. Comment ?

2 - Hypothèses retenues sur les processus d'apprentissage en physique :

a - le constructivisme

C'est un modèle d'apprentissage caractérisé par la recherche de sens et basé sur l'activité intellectuelle de l'apprenant en interaction active avec l'environnement. Ce modèle donne une place importante aux représentations des élèves avant enseignement. Elles sont à l'origine de l'apprentissage qui se fait en filiation et en rupture avec les structures existantes.

Il est donc important de faire exprimer aux élèves leurs représentations, bases actives de leur raisonnement et de les mettre à l'épreuve d'expériences.

b - la dévolution et la médiation

" Il s'agit non pas de communiquer les informations que l'on veut enseigner, mais de trouver une situation dans laquelle elles sont les seules à être satisfaisantes."

Dans ce cadre le sujet assume lui-même son apprentissage, crée lui-même sa propre signification. L'enseignant confie à l'élève la charge d'apprendre en lui fournissant :

- un obstacle procureur de sens, d'où naît le besoin du concept, partiellement transmis,
- qu'il enrichira peu à peu en le faisant travailler dans des situations diverses qui permettent de tester son domaine de validité et de commencer à entrevoir son utilité.

c - la pédagogie de la maîtrise

Elle demande :

- de vérifier la maîtrise des prérequis avant d'aborder un nouvel apprentissage, pour que l'élève puisse prendre appui dessus pour construire d'autres connaissances
- ainsi, une maîtrise convenable permet de réussir au début et d'améliorer le degré de motivation par des expériences valorisantes, telles la réussite des premières étapes.

3 - Connaissances de didactique de l'électrocinétique

a - représentations présentes

- raisonnement causal linéaire, sous la forme du raisonnement séquentiel
- agent-patient ou difficulté du concept d'interaction : la pile impose au circuit, ou la lampe prend ce qu'il lui faut ...
- propriétés intrinsèques attribuées aux objets, telle la pile qui débite un courant constant ...
- substantialisme : le courant est un fluide matériel qui stagne dans les conducteurs.

Ces représentations, mises en oeuvre pour décrire le fonctionnement d'un circuit électrique simple, s'articulent autour de trois raisonnements : local, séquentiel et à courant constant.

b - difficultés propres au domaine étudié

- lecture des schémas : savoir reconnaître si deux dipôles sont en série ou en dérivation ...
- conceptualisation des grandeurs $U / I / R$ afin que les lois ne se résument plus à des formules magiques vides de sens ...

c - nature du savoir visé par la séquence

- des **concepts** inventés par les physiciens pour tenter de se former une image de la réalité afin d'être à même d'expliquer, mais aussi de prévoir par
 - des **modèles** de fonctionnement
- autant d'approches nécessitant un processus de **transmission sociale** que l'élève aura à s'approprier et à enrichir par un mécanisme de va et vient entre ce qu'ils permettent de prévoir et la confrontation expérimentale, le concept ne prenant sens que par rapport à des situations expérimentales.

Conclusion : la démarche envisagée **demande de prendre du temps** pour

- **vérifier** les prérequis
- proposer une situation énigmatique qui permet à l'élève :
 - de **s'approprier** le problème
 - d'**explicit**er ses représentations lors de la demande de prévisions
- la mise en commun qui permet de **prendre conscience de leur diversité** :
 - idées **mises à l'épreuve** du raisonnement et, ou de l'expérience.

Alors le professeur propose un **début de modèle** qui permet d'interpréter l'expérience. Il faut encore du temps à l'élève pour :

- mettre en forme et **structurer** par écrit ce qu'il a découvert
- **se l'approprier**
- le **réinvestir** lors de la demande de prévisions sur une nouvelle situation,
- à renouveler lors du test.

C'est une approche progressive où le savoir enseigné a un caractère temporaire qu'il partage avec le savoir scientifique. Il y a construction progressive de la grandeur physique par l'attribution de propriétés. L'utilisation fréquente de l'expression : "**tout se passe comme si**" est là pour tenter de faire prendre conscience aux élèves du caractère hypothétique, provisoire et limité d'un modèle.

II / Hypothèses

Ces constructions théoriques, élaborées dans les recherches, le chercheur veut les mettre à l'épreuve en situation de classe et observer l'évolution des représentations avec la prise de **sens** des concepts sous l'effet des modifications qu'il apporte à l'enseignement usuel par ses hypothèses. (La première serait peut-être de donner le temps nécessaire aux différentes étapes de l'apprentissage.)

La première repose à la fois sur le constat d'une très grande hétérogénéité des savoirs des élèves et sur les travaux de la pédagogie de la maîtrise : il s'agit de faire l'hypothèse qu'on réduit significativement la dispersion des résultats à l'arrivée si l'on **assure l'homogénéité de la maîtrise des prérequis** au départ.

La deuxième est que si la construction des concepts repose sur une **approche qualitative** qui leur **donne sens**, on évite la réduction de la physique enseignée à son seul formalisme. On permet la construction d'une véritable compréhension des phénomènes susceptible ensuite, et ensuite seulement, de piloter le formalisme. Cette hypothèse, éloignée des pratiques usuelles, constitue un choix de modèle d'apprentissage qui place le formalisme en fin de processus et non à son origine.

La troisième est qu'une première **approche énergétique** du circuit électrique devrait éviter que les élèves ne considèrent le courant électrique comme un flux d'énergie consommable, (ce que laisse penser le langage usuel et qui est constaté dans les travaux de recherche).

La dernière est qu'une **introduction indépendante et progressive des concepts** est de nature, au travers d'une construction qualitative d'abord, à leur donner **sens**, et à faciliter par la suite leur mise en relation nécessaire à la compréhension des mécanismes régissant le fonctionnement du circuit. La formulation de la loi d'Ohm apparaît comme l'aboutissement inévitable de ce processus d'apprentissage.

III / Généralités concernant la rédaction et le déroulement

Convention : ce qui est destiné au *prof* seul est en *italique*, le reste est destiné à être enseigné plus ou moins développé selon l'auditoire ...

Habituellement je propose toujours **deux** questionnaires, **deux** tests ...voisins mais distincts. A l'origine la volonté d'obtenir un **travail personnel**. Dans cette démarche, c'est aussi l'occasion lors de la mise à l'épreuve de l'expérience des prévisions, d'avoir deux situations expérimentales et donc d'un premier **réinvestissement** avec la deuxième situation.

Les **fiches questionnaires** à distribuer au cours précédent le T.P. (15 à 20 min environ) ont toutes **deux parties** (qu'il conviendrait sans doute d'isoler par un pointillé ou un trait) :

- le haut de la feuille est une demande de prévisions à faire remplir en cours puis à relever
- le bas ne sera à compléter qu'au T.P.

Ainsi la fiche peut être lue par l'enseignant entre cours et T.P. ce qui lui permet de se préparer aux échanges et aux négociations, prévoir le matériel ... en connaissant le terrain.

Questionnaires, expériences, test, laisseront de **nombreuses traces écrites**. C'est volontaire :

- c'est le seul moyen d'observation qui reste au chercheur s'il ne veut pas trop perturber le déroulement du cours (comparé aux moyens vidéo ...)
- ces traces sont utiles pour l'apprentissage, processus long et laborieux, qui ne se résume pas à coller la connaissance nouvelle à la place de l'ancienne, et qui **nécessite du temps** :
 - temps d'appropriation du problème,
 - temps de structuration par la formulation de sa propre hypothèse, de celles de la classe... (faire prendre conscience aux élèves de la multiplicité des interprétations présentes, les traiter comme des hypothèses mises à l'épreuve du raisonnement des copains ou de l'expérience.)
 - temps d'appropriation de la connaissance nouvelle, et enfin
 - temps de réinvestissement, occasion pour les uns de conforter les acquis et éventuellement les préciser, alors que pour d'autres c'est une nouvelle perche tendue pour accéder aussi à la nouvelle connaissance.

Quel dialogue prof-classe quand il négocie des changements cognitifs?

Il est fait d'interactions, d'échanges entre élèves et entre élève(s) et l'enseignant (qui ne transmet plus un discours mais accompagne les élèves) qui se veulent sources de progrès cognitif. Les plus efficaces consistent le plus souvent en **reformulations** qui permettent **d'échanger**, c'est à dire de **partager** quelque chose :

- tu as dit : "...
- il te semble que : " ... marque discursive du locuteur / au contenu qui est une invitation à en discuter
- ai-je bien compris, tu voulais dire : " reformulation de proximité
- ou bien voulais tu dire plutôt : " ... propose une évolution
- les agresser, reculer ... pour les engager sur une voie nouvelle ... avec des mots communs, un registre symbolique auquel on peut faire appel, quitte à inventer un système de représentation intermédiaire, un langage intermédiaire pour parler ensemble ce qui permet non seulement un processus de traitement de l'information, mais surtout un processus de signification, qui ne préexistait pas au discours mais qui est le fruit des échanges : il y a **construction d'une signification partagée** : le pronom personnel peut devenir **NOUS**, comme lorsqu'on les engage dans une tâche : " nous allons ... Cette démarche semble la plus apte pour négocier progressivement des transitions acceptables par l'élève.

L'idéal serait :

- que toutes les interprétations repérées lors du questionnaire préliminaire aient pu être verbalisées, exprimées, traitées comme des hypothèses scientifiques et que chaque élève ait trouvé une réponse à sa question.
- que toutes les phrases inattendues puissent être écrites (avec éventuellement possibilité d'entretien avec l'élève pour lui faire préciser sa pensée)
- que les élèves rédigent des fiches mémoire, occasion pour l'élève d'appropriation en reformulant ce qu'il a découvert sous une forme personnelle facile à consulter, étape importante de la mise en mémoire.

Ce déroulement **nécessite un temps** difficile à décrire très précisément en l'état actuel, environ un trimestre avec peu de T.P. de chimie. Quelles sont les bases de connaissances du programme de seconde en dehors de l'électricité ? Aussi cela vaut-il peut-être le coup de faire quelque chose pour ne plus entendre en première :

" je confonds I et U, je ne sais pas ce que c'est ...",
d'autant qu'il reste le temps d'approfondir les autres concepts comme les ondes, leur modèle de propagation, et leurs propriétés ...

sinon ...

"le prof a vu le programme et l'élève a vu le prof ..."

IV / Remarques après un premier essai

1 - Rythme à adopter

S'il y a hétérogénéité à l'intérieur des classes, il y a aussi *hétérogénéité d'une classe à l'autre*. Une première expérimentation a mis en lumière l'existence de classes où les élèves ont eu l'impression de répétitions abusives au cours de la première étape.

Le but étant de progresser avec l'élève, **d'éveiller sa curiosité et non de le lasser**, c'est à l'enseignant que revient la tâche de mesurer après chaque questionnaire l'état des connaissances préalables. Il peut alors prendre la décision de passer **plus ou moins vite** :

- sur des observations lorsqu'elles n'offrent aucun effet de surprise et de proposer aussitôt les réinvestissements sur des situations moins usuelles ou,
- si un concept semble maîtrisé par la quasi unanimité du groupe, le réinvestissement n'est peut-être qu'à proposer à titre d'exercice intellectuel, corrigé par les élèves eux-même, pour tenter de raccrocher les quelques "retardataires" avant le test et le passage au thème suivant ou,
- sur la correction d'un test qui peut ne se faire qu'intellectuellement, ou avec quelques expériences : l'élève ne réalisant que celle(s) où la réponse reste hypothétique ...

2 - l'interrupteur

Une difficulté relevée jusque là de façon épisodique semblerait gagner en fréquence. Elle vient du vocabulaire utilisé pour parler de l'interrupteur :

ouvert, le courant passerait et **fermé, le courant serait stoppé.**

Aussi une mise au point préliminaire semblerait nécessaire, à défaut de quoi, les prévisions se trouvent inversées par rapport à celles attendues, parfois difficiles à interpréter : on n'est jamais sûr de parler de la même chose.

Plan de la Séquence

d'enseignement de l'électricité en classe de seconde

Introduction p.1

A / Circuits simples

1° étape p.3
 Questionnaire préliminaire sujet A p.4
 sujet B p.7
 Exploitation : **Circuit - Circulation** p.10
 I / Le circuit fermé p.11
 II / Le circuit ouvert p.14
 III / Une analogie pour comprendre p.16
 IV / Réinvestissement p.18
 V / Le schéma électrique p.19
 Evaluation : circuit / circulation p.21

2° étape
 Questionnaire avant d.d.p. sujet A p.27
 sujet B p.30
 Cause du fonctionnement : **concept de d.d.p.**
 I / Approches p.33
 II / Exploitation du questionnaire (T.P.) p.35
 III / Analogie p.36
 IV / La d.d.p.
 V / Réinvestissement
 Evaluation + questionnaire avant intensité

3° étape
 Mesure de la circulation : **concept d'intensité**
 I / Rappels et définitions
 II / Lois de l'intensité
 III / Réinvestissement
 Evaluation : test I + U

4° étape
 La régulation du débit : **concept de conducteur résistant**
 I / Expériences
 II / Résistance équivalente
 III / Conclusion : loi d'Ohm

5° étape

Différents générateurs

I / Loi d'Ohm générateur

II / conclusion : le circuit, système en interaction

B / Circuits mixtes (réinvestissement)

- 1 - lecture des schémas
- 2 - prévisions : dipôles traversés ou non par un courant
- 3 - prévisions : d.d.p.
- 4 - prévisions : intensité
- 5 - la loi d'Ohm

ANNEXE V

Texte de la SEQUENCE d'enseignement de l'électricité

**d'enseignement de l'électricité
en classe de seconde**

Introduction	p.1
1° étape : circuit - circulation	p.3
Questionnaire préliminaire sujet A / B	p.4 / 7
Exploitation : Circuit - Circulation	p.10
I / Le circuit fermé	p.11
II / Le circuit ouvert	p.14
III / Une analogie pour comprendre	p.16
IV / Réinvestissement	p.18
V / Le schéma électrique	p.19
Evaluation : circuit / circulation	p.21 / 24
2° étape : cause du fonctionnement : concept de d.d.p.	
Questionnaire avant d.d.p. sujet A / B	p.27 / 31
Exploitation : différence de potentiel ou tension électrique	
I / Approches	p.35
II / Exploitation du questionnaire (T.P.)	p.37
III / Analogie	p.38
IV / La d.d.p. entre deux points	p.44
V / Réinvestissement	p.48
Evaluation d.d.p.	p.50 / 52
3° étape : mesure de la circulation : concept d'intensité	
Questionnaire avant enseignement	p.54
Exploitation : intensité d'un courant continu	p.58
I / Expériences	p.58
II / Rappels et définitions	p.61
III/ Lois de l'intensité	p.63
IV / Réinvestissement : questionnaire exploitation	p.68 p.76
Evaluation : test I + U	p.79 / 81

4° étape : La régulation du débit : concept de conducteur résistant

T.P. préliminaire : jeu des résistors	p.83
Exploitation : les résistors ou conducteurs résistants	p.86
I / Expériences - qualitatives	p.86
- loi d'Ohm	p.88
II / Associations de conducteurs ohmiques	p.88

5° étape : un système en interaction : le circuit électrique

I / Les générateurs de tension continue	p.91
II / Le circuit, système en interaction	p.92
T.P. : générateur idéal ou pas ?	p.96

Questionnaire : évaluation d'électricité en fin de seconde	p.97 / 102
---	------------

Annexe : article de G.Robardet : le jeu des résistors	p. 107
--	--------

Introduction aux cours

d'électricité

Classe de 2^o

Dans la séquence, lorsque le chercheur s'adresse à l'enseignant de la séquence, il écrit en italique.

Que font vraiment les physiciens ou les chimistes ?

Ils tentent d'expliquer ce que l'homme observe, par la mise en place de concepts et de modèles. Ils sont construits par l'esprit humain pour résoudre des problèmes. Les choses nous sont données à interpréter : modèles et concepts permettent de comprendre, d'expliquer et de prévoir. Ils sont construits pour être questionnables. Ces modèles ont :

- un domaine d'application, où ils sont plus ou moins prédictifs du phénoménal,
- et des limites.

L'histoire des sciences, c'est aussi l'histoire de l'homme, son aptitude à entrer progressivement dans la complexité de la science, en :

- faisant évoluer le modèle, ou
- en changeant de modèle.

Cette année, nous venons vous proposer un **enseignement différent** dans le cadre :

- de votre **programme**
- d'un **travail de recherche**.

Vous vous trouvez donc, avec moi, engagés et associés à un travail de recherche :

Comment rendre l'élève capable de comprendre, puis de prévoir le fonctionnement d'un circuit électrique ?... et peut-être, en passant par quelles étapes y parvient-il ?

Dans ce but, la démarche n'est pas celle de l'enseignement traditionnel, qui vous présente les lois et vous propose de les vérifier expérimentalement,

(ce qui aboutit le plus souvent à réduire la science à un empilement de lois et de formules plus ou moins magiques, ... sans signification pour l'élève ... donc sans utilité ...sinon peut-être, si on a la chance ... de permettre une bonne note ...).

Cette année, on va **partir de votre façon d'imaginer le fonctionnement du circuit**, objet familier, quotidien, dont vous avez une vision opérationnelle dans la vie de tous les jours, mais qui ne vous permet peut-être pas de répondre à toutes vos questions à son sujet, ou d'expliquer toutes les observations que vous allez être amenés à faire.

Pour cela, nous avons besoin de **votre coopération active** afin de connaître vos représentations du fonctionnement du circuit, puis leur évolution en fonction des apports extérieurs ... donc de nombreuses traces écrites. C'est pourquoi la démarche adoptée débutera le plus souvent par :

1 - un **questionnaire** avant enseignement, vous présentant un circuit et vous demandant de prévoir ce qui s'y passe. Vos prévisions découlent de votre façon d'imaginer le fonctionnement du circuit.

Il arrivera même, peut-être que l'on vous demande de bien vouloir participer à un **entretien** enregistré avec le chercheur, afin de vous faire préciser vos idées par rapport au circuit, dans le but qu'il comprenne mieux l'origine d'une réponse, pour lui, inexplicquée.

Ces prévisions, chercheur et enseignants en prennent connaissance, pour construire le cours suivant, ce qui permet un enseignement plus personnalisé, aux étapes graduées en fonction de vos difficultés.

2 - ces prévisions seront mises en commun : vous pourrez constater la **diversité** des représentations présentes dans la classe.

- ces prévisions auront un statut de **véritables hypothèses** à débattre par la communauté scientifique de la classe. Certaines se trouveront éliminées par un raisonnement, pour les autres on aura recours à l'expérience :

- vous voyez que l'expérience prend une toute autre dimension, voisine de celle des premiers physiciens de l'électricité ou des chercheurs actuels : vos hypothèses, tout à fait légitimes, se trouvent **mises à l'épreuve de l'expérience** : elles se trouveront confirmées ou contredites par l'expérience :

Que va-t-il se passer ? Est-ce ce que j'avais prévu ? Sinon, pourquoi ?

Ce qui au vu des essais précédents a bien motivé, aiguisé la curiosité, l'envie de comprendre, des élèves concernés.

*On essaie de comprendre ensemble, parfois avec l'aide de supports concrets, les **analogies** (ce qui est analogue permet des prévisions ... à vérifier). Puis le circuit évolue un peu, avec de nouvelles demandes de prévisions, où l'élève utilise sa compréhension du circuit ... occasion de réinvestissement pour les uns, de comprendre enfin pour d'autres ...*

Cela demande d'accepter de remettre en cause l'idée que l'on s'était faite, lorsque notre modèle ne permet pas de prévoir ou d'expliquer, pour accéder à un nouveau modèle plus performant. Cette démarche sera à renouveler de proche en proche pour atteindre une vision plus précise de la complexité (ou de la simplicité) du monde qui nous entoure.

Je pense que c'est pour vous une démarche nouvelle dans laquelle je vous invite à avancer. Elle demande de la **curiosité**, un **travail régulier** qui aboutit à un début de compréhension du monde physique dans lequel nous vivons. Elle est la démarche de tout chercheur, de tout scientifique qui confronte ses idées à l'expérience, puis à la communauté scientifique internationale.

D'avance merci pour votre collaboration, en espérant qu'à l'usage vous apprécierez la démarche.

Matériel : leur demander de prévoir un classeur contenant le dossier électricité. Y placer :
- sous feuillet plastique, les questionnaires

(qui après exploitation seront relevés et transmis au chercheur)

- et en face les apports théoriques s'y rapportant : les conclusions tirées ensemble, les exercices, et les fiches mémoire (leur demander de rédiger, après chaque cours "ce que tu as découvert, que tu veux retenir et comment tu penses le mieux t'en rappeler : phrases et ou schémas, avec ou sans couleurs "...) qui constitueront leur cours.

Question : sur une feuille de brouillon leur demander de représenter :

- une pile - une ampoule - un interrupteur ouvert - un interrupteur fermé.

Mettre en commun, afin que tout symbolisme utilisé dans le questionnaire préliminaire soit lisible. Insister si besoin sur l'**interrupteur**, où nous avons pu observer de fréquentes confusions. (peut-être dues à une analogie spontanée répandue avec le robinet)

1° Etape

Objectifs d'apprentissage :

- nature du courant
- une circulation est un mouvement orienté des porteurs de charge
(composante ordonnée qui s'ajoute au mouvement aléatoire des électrons : c'est la charge qui avance)
- nécessité de fermeture du circuit pour qu'il circule un courant

Questionnaire préliminaire :

(à faire passer en classe entière et relever pour pouvoir en prendre connaissance avant son exploitation en T.P.)

But : le questionnaire recherche l'existence d'une circulation

- quelque part dans un circuit lorsqu'il est ouvert
 - dans la pile en circuit fermé ou ouvert
- puis lors de l'évaluation, la comparaison de la circulation en différents points d'un circuit fermé.

Texte introductif aux questionnaires

(à lire avant le premier)

Un questionnaire n'est pas un contrôle, ni une interrogation, ni un examen. Il s'agit d'une **enquête** visant à mieux **connaître les difficultés** rencontrées par les élèves lorsqu'on leur enseigne l'électricité, dans le **but** d'appuyer le cours sur les connaissances réelles et d'insister sur ce qui est inconnu, au lieu de se fier à ce qui est supposé connu d'après les instructions officielles. Pour mener à bien cet **enseignement plus personnalisé**, mieux adapté votre réalité, nous vous demandons votre collaboration :

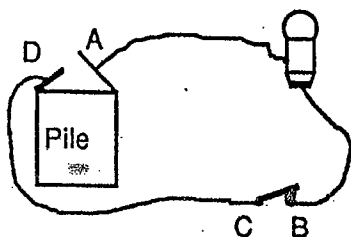
- répondez aux questions le plus **spontanément** possible sans vous soucier de l'état de vos connaissances, c'est ce que vous pensez qui nous intéresse, pas vos connaissances scolaires.
- prenez votre temps pour répondre, il ne vous est pas limité.
- si une question vous paraît évidente, ou faisant double emploi, signalez le.
- pour chacune des questions qui vous sont posées, vous pouvez vous expliquer par un dessin ou indiquer tout ce que vous voulez sur le dessin existant.
- si après avoir répondu à une question, **vous changez d'avis**, **barrez** votre première réponse, mais **ne l'effacez pas** : elle nous intéresse aussi. : écrire au **réécriveur** ou **bic non effaçable**, blanco interdit
- pour chacune des questions expliquez bien **pourquoi**, c'est **plus important que de répondre** à la question
- si vous ne pouvez répondre à l'une ou l'autre question, indiquez simplement : "je ne sais pas"

Bon travail et merci.

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

Question I



Ce schéma représente un **circuit** électrique constitué d'une **pile** AD reliée par des fils à une ampoule et un **interrupteur fermé** CB.

1 - Compléter le tableau :

dans le	existe-t-il un courant	explique maintenant clairement pourquoi :
tronçon :	électrique ?	
AB	oui / non	
CD	oui / non	
BC	oui / non	
intérieur pile	oui / non	

2 - Lorsqu'une ampoule électrique est allumée, que devient le courant électrique qui arrive dans l'ampoule ?

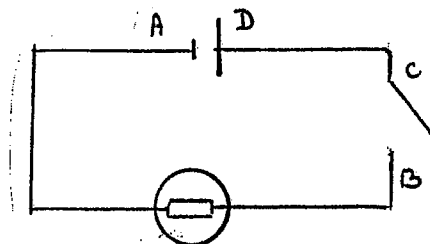
Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Réalise l'expérience puis note tes **observations** :

Essaie de tirer des **conclusions** en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

Question II



Ce schéma représente le même circuit électrique où :

- AD représente la pile
- l'interrupteur CB est maintenant ouvert.

1 - Compléter le tableau :

dans le	existe-t-il un courant	explique clairement pourquoi :
tronçon :	électrique ?	
AB	oui / non	
CD	oui / non	
BC	oui / non	
intérieur pile	oui / non	

2 - L'ampoule éclaire-t-elle ? oui / non ? Pourquoi ?

3 - Lorsqu'un interrupteur est ouvert, lui arrive-t-il du courant électrique ?

- si oui, d'un seul côté, ou des deux ? Que devient-il ?
- sinon, pourquoi ?

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

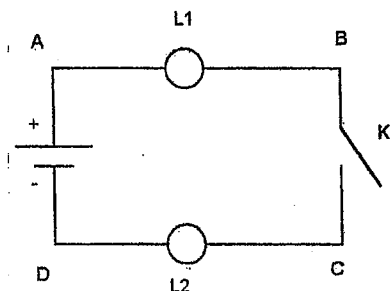
Réalise l'expérience puis note tes observations :

Essaie de tirer des conclusions en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

Question III : Réinvestissement

On considère le schéma ci-dessous : il représente un circuit constitué de deux ampoules L₁ et L₂ identiques, d'une pile AD, de fils et d'un interrupteur K d'abord ouvert, puis fermé, puis ...



Dans chaque cas, on te demande de :

- prévoir si un courant circule dans certains tronçons et
- d'expliquer pourquoi

	circulation :	explication :
1 - K ouvert	oui / non	
tronçon		
AB		
BC		
CD		
intérieur pile		
2 - K fermé		
tronçon		
AB		
BC		
CD		
intérieur pile		
3 - K fermé et L1		
dévisée		
AB		
BC		
CD		
intérieur pile		

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Réalise l'expérience puis note tes **observations** :

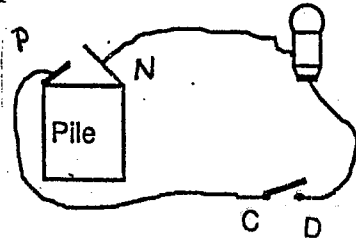
Essaie de tirer des **conclusions** en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

QUESTIONNAIRE PRELIMINAIRE

à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde

Question I



Ce schéma représente un **circuit** électrique constitué d'une **pile** PN reliée par des fils à une ampoule et un **interrupteur ouvert** CD.

1 - Compléter le tableau :

dans le	existe-t-il un courant	explique maintenant clairement pourquoi :
tronçon :	électrique ?	
PC	oui / non	
CD	oui / non	
DN	oui / non	
intérieur pile	oui / non	

2 - L'ampoule éclaire-t-elle ? oui / non ? Pourquoi ?

3 - Lorsqu'un interrupteur est ouvert, lui arrive-t-il du courant électrique ?

- si oui, d'un seul côté, ou des deux ? Que devient-il ?
- sinon, pourquoi ?

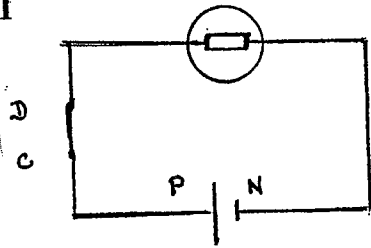
Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Réalise l'expérience puis note tes **observations** :

Essaie de tirer des **conclusions** en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

Question II



Ce schéma représente le même circuit électrique où :

- PN représente la pile
- l'interrupteur CD est maintenant **fermé**.

1 - Compléter le tableau :

dans le tronçon :	existe-t-il un courant électrique ?	explique clairement pourquoi :
PC	oui / non	
CD	oui / non	
DN	oui / non	
intérieur pile	oui / non	

2 - Une fois l'ampoule allumée, reste-t-il du courant électrique après l'ampoule ?

- sinon, qu'est-il devenu ?
- si oui, explique pourquoi :

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

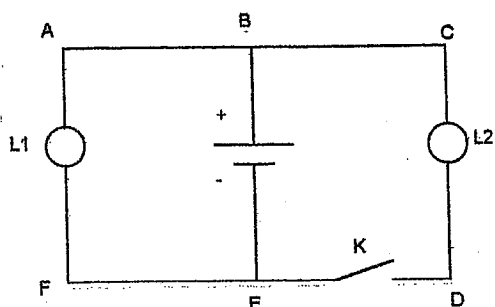
Réalise l'expérience puis note tes **observations** :

Essaie de tirer des **conclusions** en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

Question III : Réinvestissement

On considère le schéma ci-dessous : il représente un circuit constitué de deux ampoules L₁ et L₂ identiques, d'une pile, de fils et d'un interrupteur K d'abord ouvert, puis fermé, puis ...



Dans chaque cas, on te demande de :

- prévoir si un courant circule dans certains tronçons et
- d'expliquer pourquoi

	circulation :	explication :
1 - K ouvert	oui / non	
tronçon		
AF		
BC		
ED		
intérieur pile		
2 - K fermé		
tronçon		
AF		
BC		
ED		
intérieur pile		
3 - K fermé et L2		
déviscée		
AF		
BC		
CD		
intérieur pile		

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Réalise l'expérience puis note tes **observations** :

Essaie de tirer des **conclusions** en repensant à tes hypothèses :

Conclusion de la classe :

CIRCUIT et CIRCULATION

(cours ou T.P. cours)

Objectifs d'apprentissage de cette première partie :

amener l'élève à se représenter :

- le **circuit** comme une boucle fermée, y compris à l'intérieur de la pile ;
- le **courant**, ou l'électricité (selon l'étiquette portée par la notion unique), dans un premier temps comme une **circulation** de charges, ce qui permet aussi une approche du **rôle de la pile**, traversée par le courant et cause de sa circulation ;

(On peut rencontrer par exemple :

- "pompe identique au coeur qui est traversée et qui fait circuler" (Marie)
- "une borne possède des électrons qu'elle libère peu à peu ... vers l'autre borne."
d'où viennent-ils ? " C'est un réservoir : ils sont là."

- " La circulation à l'intérieur ne rend pas compte de l'usure de la pile."

Y a-t-il une différence pour toi entre un électron libéré au pôle - de la pile, et un électron qui arrive au pôle + ? " oui, il a perdu de l'énergie." ...)

- le **circuit ouvert**, autrement que comme une canalisation d'eau qui arrive à un robinet fermé, et envisager diverses causes d'ouverture du circuit.

Il nous est apparu important de découvrir le **circuit fermé** en le comparant au **circuit ouvert**, (connaissance implicite qui cache bien des représentations personnelles). Dans une première approche il semble utile de parler autant de l'un que de l'autre.

Exploitation du questionnaire : démarche générale après tout questionnaire :

Regrouper les élèves par 4, (simplement les élèves des rangs impairs se retournent vers ceux des rangs pairs), pour les 5 à 10 min d'échanges pour connaître les questions I et II du voisin et échanger les réponses : cette première étape est une démarche d'interaction sociale, sans médiation. Puis :

- **mise en commun** et repérage des idées, donc des **questions**, **hypothèses** à discuter ou mettre à l'épreuve de l'expérience ... (nécessité de passer d'une démarche individuelle à une démarche collective)

S'il apparaît des **hypothèses communes** les inscrire au **tableau**.

Autant de questions auxquelles nous allons tenter de trouver, ensemble, une réponse qui se précisera au fil des séances ... Ce seront nos **hypothèses à vérifier par l'expérience** : vous allez donc **compléter sur votre questionnaire les leur faire énoncer avant de les écrire au tableau** :

- circule-t-il quelque chose à l'intérieur de la pile, en circuit fermé ? en circuit ouvert ?
- circule-t-il quelque chose quelque part en circuit ouvert ?

Leur demander, maintenant, d'écrire sur une feuille à placer en face de la question correspondante.

Nous étudions l'électricité en réalisant des circuits électriques : **circuit, circulation et courant** sont des mots de la vie quotidienne. Pouvez-vous trouver des exemples :

afin de mettre un même contenu sous ces mots, par un travail sur des exemples pris d'abord dans la vie courante (thèse venturini p.14-20)

courant un courant d'air, marin, le courant d'un fleuve, d'une rivière en crue
leur faire trouver : contient l'idée d'un déplacement, d'un mouvement ...
et en électricité, existe-t-il un déplacement de quelque chose quelque part ?

circuit automobile (24h du Mans), pédestre, en V.T.T. ou motocross, en car ou d'un train électrique : enfant, comment réalise-t-on un circuit pour son train électrique ou ses petites voitures ? ...

leur faire trouver : est toujours une boucle fermée ... à parcourir ...
et en électricité, comment construit-on un circuit ?

circuler ! si tel est l'ordre du gendarme qu'attend-il que vous fassiez ? se déplacer
(on cherche à faire réfléchir sur un courant qui stagne dans les conducteurs : "courant = présence d'électrons").

circulation : automobile, sanguine, dans un chauffage central ... des élèves dans les couloirs, ce qui circule est-il immobile ou en ... mouvement ? ...
Et en électricité, qu'en est-il ?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous allons considérer différents éléments du circuit ... et leur rôle par rapport à la circulation.

I / Le circuit électrique fermé

1 - partie du circuit extérieure à la pile

en T.P. rappel des - **hypothèses** en présence : à faire reformuler :

- **expérience** : comment peut-elle répondre à nos questions ?

l'ampèremètre est souvent spontanément proposé, mais pour la pile ? On verra plus loin ...

Rappel : montage et lecture de l'ampèremètre.

expérience et observation des indications des 3 ampèremètres : écrire une

- **conclusion personnelle** puis mise en commun et

- **conclusion de la classe** à inscrire au tableau et sur leurs feuilles ...

Rappel du modèle atomique en chimie dans l'idée d'initier un début de modèle circulaire en électricité : tenter une première représentation de la circulation :

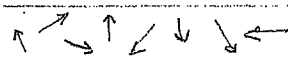
De quoi est constitué le circuit à l'extérieur de la pile ? Essentiellement par :

- Le fil électrique

apport ou rappel : les métaux : que savez-vous de la structure métallique ?

Ils sont constitués d'atomes ... oui, mais pas n'importe lesquels, qu'ont-ils de particulier ? ... Des **électrons libres**, ainsi nommés parce qu'ils sont libres de se déplacer, avec des mouvements désordonnés comme les élèves dans la cour de récréation...

Dans un circuit où se trouvent l'essentiel des électrons libres ? ... arriver à leur faire trouver ... dans les fils ! Même quand le circuit est interrompu, la majorité des électrons se trouve dans les fils.



Que se passe-t-il lorsqu'ils se trouvent dans un circuit électrique, c'est à dire une chaîne métallique comportant :

- seulement des fils ?

- ... ampoule ...



- et une pile : Qu'a-t-elle de particulier ?

J'attends "des bornes + et -"

Quel peut être leur effet sur les électrons libres ?

leur faire exprimer ce qu'ls savent : des charges de même signe se repoussent et de signe contraire s'attirent et conclure :

leur mise en mouvement dans une même direction, (comme les élèves dans les couloirs, les voitures sur une voie d'autoroute, les globules rouges dans les artères, veines ...), mouvement parfois qualifié d'ordonné (ni plus ni moins que celui des élèves ...)

on se contentera de cette approche : en réalité au mouvement désordonné, se superpose un mouvement d'ensemble ordonné.

Conclusion : définition de la circulation électrique

Il circule des électrons dans le circuit métallique, à l'extérieur de la pile, ou, plus précisément : il existe un mouvement orienté des porteurs de charge (électrons libres ou ions), à l'extérieur de la pile, en circuit fermé. C'est ce **mouvement "ordonné"** de la **charge** qui constitue ce que nous appellerons **le courant électrique**.

Il existe une circulation des porteurs de charge et un sens à cette circulation :

comme nos rues, elle peut-elle être à sens unique ou à double sens ?
qu'en est-il pour - les électrons libres ? ... - et les ions ?

Pour vous existe-t-il :

- une différence entre les électrons quittant la pile et ceux qui y retournent ?

à laisser sans doute des réponses affirmatives en raison de l'ampoule ...

question en attente ... c'est une question : on y reviendra ...

- une différence entre les électrons libres d'un fil :

- lorsqu'il participe à un circuit électrique fermé,

- et lorsqu'il est là seul, relié à rien ?

2 - La pile

Nous venons de voir qu'il existe une chaîne conductrice à l'extérieur du générateur. Est-elle fermée dans le générateur ?

Qu'en pensez-vous, maintenant que vous savez ce que recouvre le mot courant ?

Si besoin, apport : **La pile Daniell :**

Vous avez observé de vieilles piles : qu'y-a-t-il à l'intérieur ?

- de l'électricité ? - du courant ? - des électrons ?

on observe que :

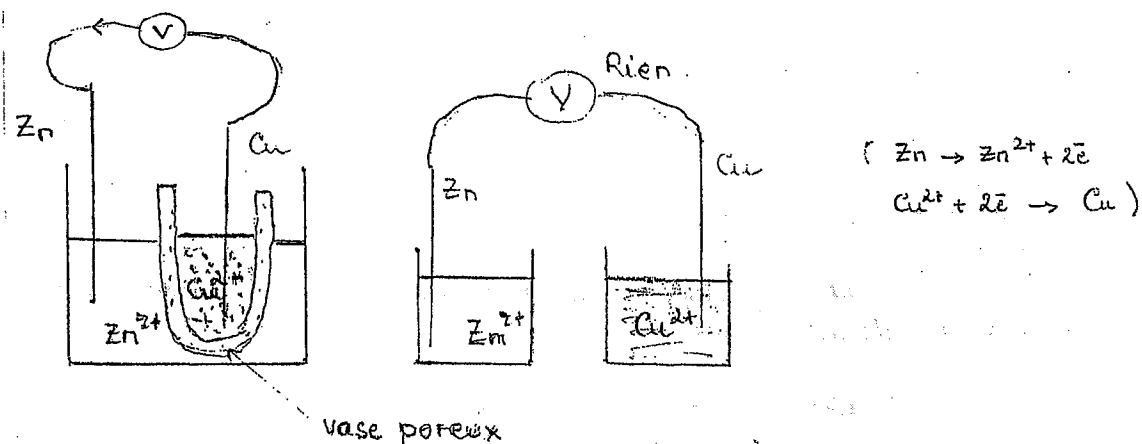
- l'extérieur est "rongé" : il est en zinc

- au milieu un cylindre noir qui fait penser à du ... C.

Elle contient divers produits chimiques qui vont réagir. Elle fournit de l'énergie électrique, or l'énergie, on ne sait pas la fabriquer, on ne sait que la transformer ; nous dirons donc qu'elle contient une forme d'énergie que nous appellerons chimique.

Voici une pile que vous étudierez l'an prochain plus en détail : elle a l'intérêt d'exister sous deux présentations différentes qui peuvent vous aider à comprendre ce qui se passe au niveau de la pile :

Expérience :



Que faut-il pour qu'elle fonctionne ? ils trouvent une circulation d'ions entre les deux parties

- un pont salin ... pourquoi, quel est son rôle ?
- il permet un double mouvement d'ions

Conclusion à trouver :

- il y a une circulation à l'intérieur de la pile en circuit fermé, ou
- il existe un mouvement ordonné de charges à l'intérieur de la pile en circuit fermé.

Quel schéma feriez-vous d'un circuit, maintenant ? ...

... une boucle fermée, avec une flèche indiquant le sens d'une circulation

Ressemble-t-il aux circuits de votre enfance, évoqués en début de cours ?

Définition d'un circuit électrique :

à leur faire énoncer ...

Un circuit électrique est constitué d'une chaîne conductrice fermée.

(L'importance, le rôle des différents éléments reste à préciser ...)

Retour personnel au questionnaire, interrupteur fermé ... :

compléter observation et conclusion que je tire

puis mise en commun et conclusion de la classe :

il circule quelque chose, à l'intérieur de la pile, en circuit fermé.

et ce quelque chose ... ce sont ... des charges électriques puis retour sur la

définition d'un courant :

le courant électrique est un **mouvement "ordonné" de charges** (électrons ou ions) ... le long de la boucle fermée que constitue le circuit.

[... et, peut-être lien à l'énergie ?

L'énergie, on ne sait en parler que là où elle est stockée, et là où elle est transformée :

- Que se passe-t-il dans le **générateur** ?

c'est un réservoir d'énergie (pile ou accumulateur ...) ou un transformateur (dynamo, alternateur, transformateur ...). C'est surtout un moteur à la circulation, comme le pédalier pour la chaîne de vélo

- Que se passe-t-il dans le **récepteur** ?

c'est un transformateur de l'énergie transférée par la chaîne en

- énergie calorifique et lumineuse (ampoule)
- énergie mécanique (moteur)
- énergie chimique (électrolyse)

Et les **électrons** ?

Ils assurent la mise en relation des éléments, comme la chaîne de vélo relie le pédalier à la roue, ce qui permet un **transfert d'énergie** de l'un à l'autre, ... "du lieu de stockage au lieu d'utilisation"

... idée à développer, tout en décrivant la boucle d'un circuit comportant des fils de même section, de même nature ...

Est-ce le **même nombre** qui quitte la pile et qui y retourne ?

Ont-ils la **même vitesse** au départ et à l'arrivée ? penser aux maillons de la chaîne d'un vélo ... On reviendra sur cette comparaison un peu plus tard.

II / Le circuit ouvert (T.P.)

1 - Par un interrupteur ouvert

Questionnaire : Quelle hypothèse se trouve à vérifier ?

- leur faire énoncer :

Existe-t-il une circulation quelque part lorsque le circuit est ouvert ?

ou : circule-t-il un courant en amont de l'interrupteur ouvert ?

ou : circule-t-il un courant à l'extérieur de la pile ? ... et à l'intérieur ?

puis compléter sur le questionnaire

- comment savoir ?

a - discussion :

mise en commun des réactions (expérience intellectuelle) utilisant les acquis sur la circulation :

- s'il y a une circulation d'électrons entre la pile et l'interrupteur ouvert, alors que deviennent-ils ?

- ils retournent tous dans la pile ? Est-ce possible ?

- ils restent tous dans le fil, ils s'empilent ? Peut-on accumuler des électrons sans fin quelque part ?

- ils s'échappent, s'écoulent hors du circuit, par l'interrupteur ?

- réactions Conclusion personnelle à inscrire : ...

b - expérience :

on vient de voir que lorsqu'il y a circulation, ... l'ampoule éclaire.

- ouvrons l'interrupteur, et observons ...

- permuter interrupteur et ampoule ...

noter les observations, tenter une interprétation ...

Conclusion de la classe à compléter sur le questionnaire :

aucune circulation nulle part, en circuit ouvert, à l'extérieur de la pile, et à l'intérieur ?

Peut-elle continuer sa réaction chimique sans apport d'électrons ?

aucune circulation nulle part, en circuit ouvert .

Que faut-il pour qu'il y ait circulation ?

- un générateur relié à
- une chaîne continue de conducteurs.

c - conclusion : rôle de l'interrupteur

- **fermé** : alors il se comporte comme un fil, la chaîne électronique forme une boucle complète et la "force" exercée par le générateur l'entraîne dans un mouvement continu.

- **ouvert** : la chaîne est interrompue, brisée ... aucun mouvement d'ensemble n'est plus possible. Les électrons, en majorité dans les fils, ont des mouvements désordonnés.

2 - Autres exemples de circuits "en panne", de circuits ouverts

a - Pouvez-vous trouver des **exemples** concrets de situations qui pourraient avoir le même effet ?

en l'absence de réponse, on peut proposer : que se passe-t-il si dans un circuit :

- une ampoule grillée, c'est à dire si son filament est assez usé pour ...
- ou si on dévissé une ampoule , puis la retire du circuit ?

ou : - mauvais contact au niveau d'un fil - ou fil coupé
- fusible - diode à contre sens

b - Le besoin d'**expérience** peut se faire sentir :

on dispose d'une pile, de fils, de deux lampes en bon état et d'une lampe grillée.

Est-il possible d'imaginer un circuit

- avec une lampe qui éclaire et une en panne ?
- avec deux lampes qui éclairent peu et une éteinte ?
- avec deux lampes qui éclairent bien et une éteinte ?

*Pour chaque circuit leur faire dessiner le schéma du montage proposé,
les mettre en commun,*

*en discuter, certains peuvent être équivalents et testés dans ce but
avant expérience, observation et interprétation de l'observation.*

Réaliser un montage avec une diode et une ampoule :

observer

retourner la diode, observer et interpréter

Cours après le T.P. et après le Questionnaire

Vérifier les fiches mémoire (demandées en début d'année p.2)

Puis retour sur les conclusions du T.P. :

faire reformuler par les élèves, puis

citer quelques réponses au questionnaire et en les faisant commenter :

1 - La circulation est-elle possible quelque part si K est ouvert ?

-
-

quelle image avez-vous du circuit dans ce cas là ?

aucune circulation

mouvement désordonné d'électrons

2 - La pile est-elle traversée par quelque chose ?

- en circuit ouvert ?

-

- en circuit fermé ?

-

-

oui, uniquement lorsque le circuit est fermé.

remarque sur le vocabulaire employé: (reflet de la représentation ...)

pour parler de la circulation électronique, utilisera-t-on des verbes d'état :

- il y a du courant le courant est présent le courant est à l'intérieur de la pile

- "il y a du courant qui ne circule pas"

ou des verbes de mouvement :

les électrons se mettent en route ... circulent ... se déplacent ? ... circuler étant le verbe usuel.

3 - Définitions

- circuit ?

chaîne continue d'éléments conducteurs

- circulation ?

mouvement "ordonné", mouvement d'ensemble de porteurs de charge

- rôle des charges en mouvement ?

ils apportent ... ou ils transmettent ... ou ils transfèrent l'énergie...?

nous allons le préciser :

III / Une analogie pour comprendre

Lors de l'introduction d'une notion physique ou chimique abstraite, il est souvent utile d'avoir recours à une illustration par une analogie avec un concept de la vie courante.

1 - Analogie

(un schéma peut l'illustrer)

Définition : une analogie est un système connu dont le fonctionnement présente des similitudes (des différences aussi) avec celui étudié, ce qui aide à se représenter, à comprendre, à expliquer, à prévoir le fonctionnement.

(elle est souvent partielle, centrée sur une difficulté, puis on la quitte).

Choix : c'est une analogie mécanique pour être plus accessible, plus concrète :

la chaîne de vélo.

Ces deux systèmes possèdent une source d'énergie, sont le siège d'un transfert et d'une consommation ... sans consommation de matière.

Ce choix permet d'aborder l'aspect énergétique du circuit, généralement très présent dans les réponses.

tableau à remplir selon leurs suggestions, et progressivement :

	électricité	vélo
source d'énergie	pile ; générateur	pédalier
récepteur d'énergie	lampe ...	roue
transmission de l'énergie	chaîne de conducteurs	chaîne formée de
par la circulation d'	électrons	maillons
leur vitesse est	tous la même	tous la même, à l'intérieur des fils
réglée par	générateur et récepteur	pédalier et frein
....		

- travail sur l'analogie :

1 - le circuit

La chaîne comme le circuit forment une **boucle fermée**

La chaîne donne une idée de la circulation de matière en circuit fermé : la chaîne constitue une boucle, elle s'identifie au circuit.

2 - le mouvement des particules mobiles, maillons ou électrons se fait :

- **sans accumulation** et

- **sans perte**

Les maillons sont liés entre eux, ils ne peuvent ni s'empiler, ni disparaître.

Les électrons, particules chargées négativement, se repoussent. Ils restent à des distances voisines et leur mouvement peut être considéré comme un mouvement d'ensemble.

Tous les maillons se déplacent à la même vitesse ... tous les électrons dans des fils identiques ont même vitesse moyenne ...

La vitesse reste la même pour tous : ils ne vont ni plus ni moins vite avant ou après la roue, avant ou après l'ampoule : rappel des ampèremètres observés en différentes positions d'un circuit en série ... ils indiquaient ... "ils comptaient" le même nombre d'électrons dans le même temps.

Dans les deux cas, il s'agit d'une circulation fluide, type autoroute quand tout va bien ... sans accumulation ni perte de porteur de charge : c'est ce qui constitue le "courant": revoir la définition de la circulation du courant.

3 - Energie : les deux systèmes sont des **lieux d'échanges énergétiques** :

pile	chaîne électronique	ampoule
pédalier	chaîne de vélo	roue

Ce n'est pas la présence des maillons qui assure le transfert d'énergie, mais leur ... déplacement, ce qui aide à différencier l'aspect énergétique du fluide en mouvement de son aspect matériel :

la question : les électrons quittant la pile sont-ils identiques ou non à ceux qui y arrivent ?
devient : les maillons ... sont-ils identiques ou non ... ?
et trouve une réponse ...

Le déplacement des électrons, qui restent identiques à eux-mêmes, assurent le transfert d'énergie du générateur aux récepteurs.

Les électrons ou maillons ne se fatiguent pas, ne s'usent pas lors du transfert de l'énergie ... Leur nombre est constant : ils ne sont pas grillés dans l'ampoule ou au niveau de la roue ...

2 - Rôle des électrons, à partir de celui des maillons

à tenter de faire reformuler par les élèves, (ce qu'ils trouvent seuls est su ...)

Ils transmettent, ou mieux **ils assurent le transfert de l'énergie** :

a - ils transfèrent plus ou moins d'énergie selon que :

- le pédalier apporte plus ou moins d'énergie au système
- le générateur est plus ou moins puissant

b - par un déplacement plus ou moins rapide selon que :

- l'on freine plus ou moins, ou que la pente est plus ou moins forte
- les conducteurs plus ou moins bons du circuit, qui freinent plus ou moins la circulation

c - Ils mettent en relation la pile et l'ampoule ce qui crée une interaction, un effet réciproque de l'un sur l'autre ... **Ils organisent**, et expliquent l'existence **d'une interaction** entre :

- la roue et le pédalier :

à un pédalier et une roue, une vitesse de rotation de la chaîne et de la roue

- le générateur et les récepteurs :

le générateur ne peut imposer seul quelque chose au circuit

les récepteurs ne peuvent exiger quelque chose du générateur

à un générateur et un circuit donné avec des récepteurs, une vitesse de circulation des électrons.

3 - Début de concept de conducteur résistant

exemple l'ampoule :

c'est un conducteur, moins bon qu'un fil, qui assure la continuité du circuit

et qui freine la circulation, n'étant pas un très bon conducteur :

penser au diamètre du filament ... petit chemin de campagne comparé aux autoroutes que sont les fils

... les freins d'un vélo s'échauffent, lui aussi, au point qu'il est incandescent et qu'il éclaire !

Même un moteur électrique chauffe, tout récepteur ... (*même un fil*) parcouru par un courant électrique chauffe, c'est l'effet Joule, rencontré en 3° ...

IV / Réinvestissement circuit / circulation :

distribuer la question III du questionnaire préliminaire

prendre connaissance des réponses ... noter les évolutions, progrès et régressions, stagnations ...

T.P. suivant : Réinvestissement

- 5 à 10 minutes d'échange pour connaître la question III du voisin et échanger les réponses
(par groupes de 4)

- mise en commun et repérage des idées et donc des **hypothèses** en présence :

à inscrire sur le questionnaire

Circulation : existe-t-il une circulation en circuit ouvert ?

- en amont de l'interrupteur ?
- à l'intérieur de la pile ?

existe-t-il une circulation en circuit fermé ?

- partout à l'extérieur de la pile ?
- et à l'intérieur ?

Application : réflexion sur l'influence de la place d'un interrupteur dans un circuit,
interrupteur de commande ou de protection d'un dipôle ... ou d'une installation ...

Circuit série : 2 ampoules identiques en série éclairent-elles :

- pareil ? La première plus que la seconde ?
- aussi bien qu'une seule ?

Circuit avec dérivation : 2 ampoules identiques éclairent-elles :

- pareil ?
- aussi bien qu'une seule ?

Discussion et, ou, vérification expérimentale des diverses hypothèses

- en série
- en dérivation ... observations à noter puis ...

Mettre une 3^e ampoule si besoin ... Prévoir, observer ... chercher l'explication, puis inscrire sa :

Conclusion personnelle ...

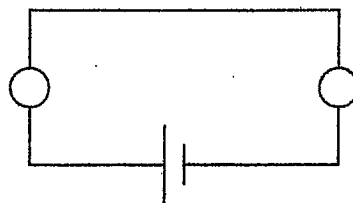
puis mise en commun et ... conclusion de la classe.

V / Le schéma électrique (rappels),

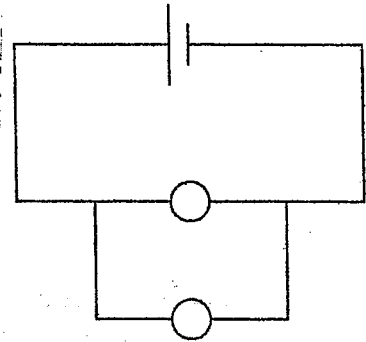
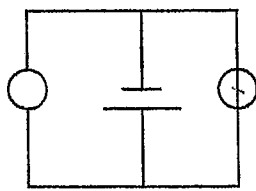
avec éventuellement réalisation expérimentale, si on est en T.P.

1 - Recherche

a - Dessiner 2 ampoules montées en série

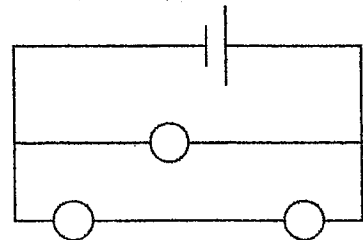
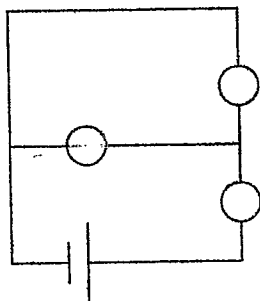


b - Dessiner 2 ampoules montées en dérivation

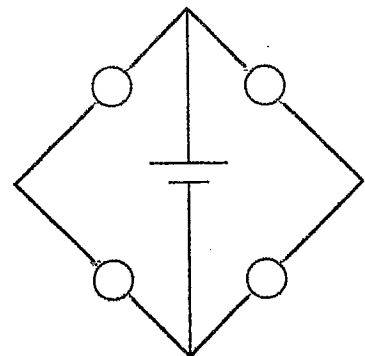
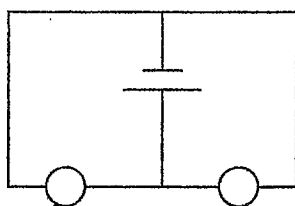


Remarque : tous ces schémas sont équivalents.

c - Dessiner tous les schémas avec 3 ampoules, en série, en dérivation et circuits mixtes (à chercher chez eux ...) :



d - Réinvestissement : décrire le montage des dipôles suivants en terme de série ou dérivation :



2 - Schéma équivalent à : (penser aussi aux circuits de la p.15 § II - 2 - b)

a - une ampoule dévissée = circuit ouvert

b - une ampoule grillée = circuit ouvert

c - une LED à contre-sens = circuit ouvert

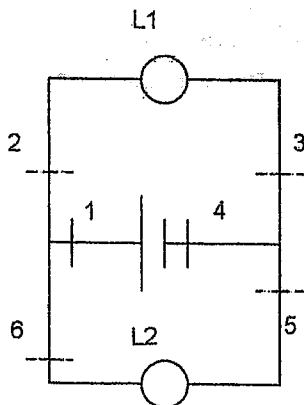
Ce travail prépare les questions sur la d.d.p. comme celles sur l'intensité.

EVALUATION / CIRCUIT - CIRCULATION

**C'est le même générateur qui est utilisé dans tous les montages.
Toutes les lampes sont identiques**

QUESTION I

Voici un montage comportant une pile et deux lampes identiques :



1 - L'éclairement de L1 est-il :

- inférieur < ,
- égal = , ou
- supérieur >

à celui de L2 ? Pourquoi ?

2 - Où peut-on placer un interrupteur K qui commande l'éclairage de L1 seulement ? En :

position de K	en 1	en 2	en 3	en 4	en 5	en 6
oui						
non						

3 - Si l'interrupteur K est à la position 5, prévoir l'éclairement des deux lampes :

L1 sera car

L2 sera car

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

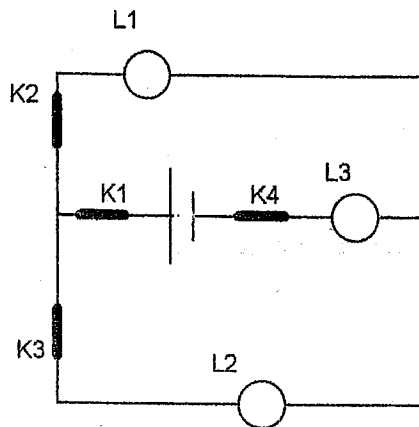
Expérience : observation :

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

QUESTION II

Le montage de cette question est réalisé à partir de celui de la question précédente auquel on ajoute une troisième ampoule, identique aux autres. K représentent des interrupteurs fermés.



1 - L'éclairement de L1 est-il :

- inférieur <
- égal, ou
- supérieur >

à ce qu'il était à la question I ? Pourquoi ?

2 - Si on ouvre l'interrupteur K2 seul, les lampes vont-elles continuer d'éclairer ?

L1 oui / non car :

L2 oui / non car :

L3 oui / non car :

Même question si on ouvre K1 seul :

L1 oui / non car :

L2 oui / non car :

L3 oui / non car :

3 - Conclure : où placer un fusible qui protège tout le circuit ? Pourquoi ?

Pourrait-il être en K4 ?

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

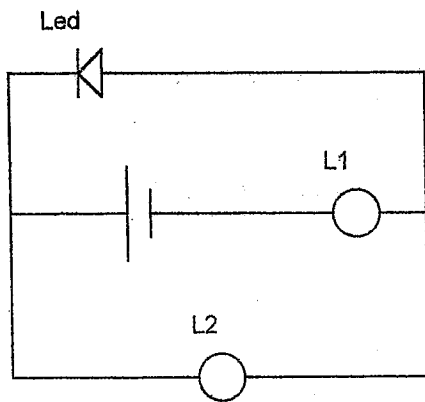
Expérience :

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

QUESTION III :

Le circuit est le même qu'à la question II, où l'une des lampes est remplacée par une diode ou led :



1 - Réfléchir aux dipôles parcourus par un courant et prévoir si :

la led éclaire oui / non car :

L1 éclaire oui / non car :

L2 éclaire oui / non car :

2 - L2 tombe en panne : que devient l'éclairement de :

la led car :

l'ampoule L1 car :

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

Expérience : observations :

J'écris mes conclusions :

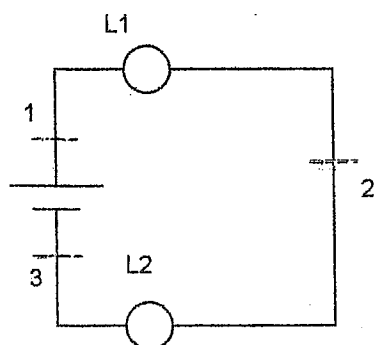
Conclusion de la classe

EVALUATION / CIRCUIT - CIRCULATION

C'est le même générateur qui est utilisé dans tous les montages.
Toutes les lampes sont identiques

QUESTION 1

Voici un montage comportant une pile et deux lampes identiques :



1 - L'éclairement de L1 est-il :

- inférieur $<$,
- égal $=$, ou
- supérieur $>$

à celui de L2 ? Pourquoi ?

2 - Existe-t-il une place pour un interrupteur, qui permette qu'une seule ampoule éclaire ?

- si oui, laquelle : 1 - 2 - 3 - et explique :

- sinon, explique pourquoi :

3 - Si l'interrupteur K est à la position 2, y aura-t-il 0, 1 ou 2 lampes éteintes ?

L1 sera car

L2 sera car

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

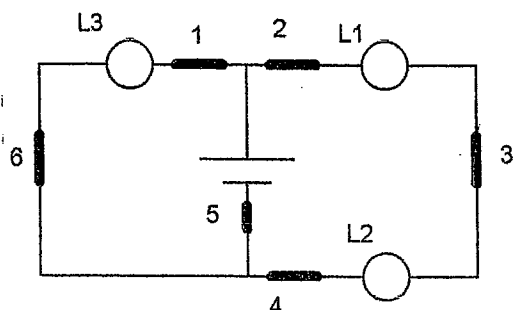
Expérience : observation :

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

QUESTION II

Le montage de cette question est réalisé à partir de celui de la question précédente auquel on ajoute une troisième ampoule, identique aux autres. Les tirets de 1 à 6 représentent des interrupteurs fermés.



1 - L'éclairement de L3 est-il :

- inférieur <
- égal, ou
- supérieur >

à celui de L1 ? Pourquoi ?

2 - On recherche les places possibles pour un interrupteur K qui ne commanderait que l'allumage de l'ampoule L3 seule :

position de K en	1	2	3	4	5	6
oui						
non						

explique ton choix :

3 - On recherche maintenant à placer un fusible, à la place d'un interrupteur, qui protégerait toutes les lampes :

fusible en	1	2	3	4	5	6
oui						
non						

explique ton choix :

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

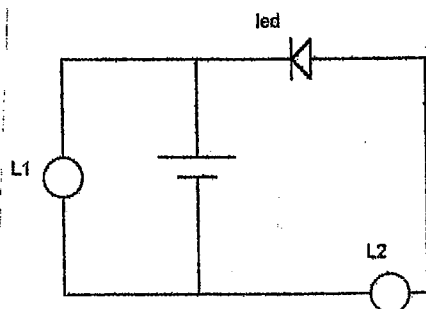
Expérience :

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

QUESTION III :

Le circuit est le même qu'à la question II, où l'une des lampes est remplacée par une diode ou led :



1 - Réfléchir aux dipôles parcourus par un courant et prévoir si :

la led éclaire oui / non car :

L1 éclaire oui / non car :

L2 éclaire oui / non car :

2 - L2 tombe en panne : que devient l'éclairement de :

la led car :

l'ampoule L1 car :

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

Expérience : observations :

J'écris mes conclusions :

Conclusion de la classe

Questionnaire avant l'introduction de la

différence de potentiel

Question I

1 - Dessiner le schéma d'un montage à réaliser qui permette à une ampoule d'éclairer :

L'alimentation porte l'indication 6V.

2 - Sais-tu s'il existe une différence de potentiel aux bornes des différents éléments ?
Complète le tableau avec tes prévisions, (que tu pourras comparer, en T.P. à des mesures) :

aux bornes de	je prévois une d.d.p. :	je mesure la d.d.p. :	
fils	$U_{\text{fil}} = \quad \text{V}$		
générateur	$U_{\text{gén.}} = \quad \text{V}$		
ampoule	$U_{\text{amp}} = \quad \text{V}$		

3 - Dans ta tête, en t'aidant si besoin des exemples précédents pour répondre ...la différence de potentiel est -elle liée à l'existence :

- de charges + et - ? - d'un courant ? - d'une possibilité d'un échange énergétique ?

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Expérience : si elle te surprend note le vite ... et tente une explication ...

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

Question II

1 - Pour te faire une farce, ton voisin, discrètement, **dévisse l'ampoule**. Dessine ce que devient ton circuit :

2 - Sauras-tu déceler la supercherie avec le voltmètre ? C'est à dire **les d.d.p. précédentes sont-elles modifiées** ? Je t'invite à écrire tes nouvelles prévisions dans le tableau :

aux bornes de	je prévois une d.d.p. :	je mesure une d.d.p. :	
fil	$U_{\text{fil}} = \quad V$		
générateur	$U_{\text{gén}} = \quad V$		
ampoule	$U_{\text{amp}} = \quad V$		

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

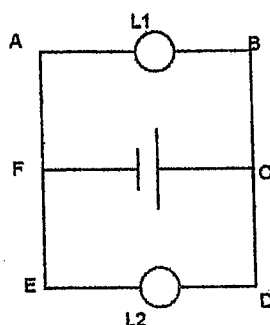
Expérience : note vite tes surprises ... et essaie de comprendre ...

Repense à la question 3 du I :

Conclusion de la classe :

Question III : Réinvestissement

1 - On réalise le montage :



On demande de prévoir la d.d.p. aux bornes des différents dipôles. Compléter le tableau :

	prévision :	mesure :	observations :
d.d.p. aux bornes :			
C et F UCF =			
A et F UAF =			
B et C UBC =			
B et A UBA =			
D et E UDE =			
Si L2 est en panne :			
entre C et F UCF =			
entre A et F UAF =			
entre B et C UBC =			
entre B et A UBA =			
entre D et E UDE =			

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

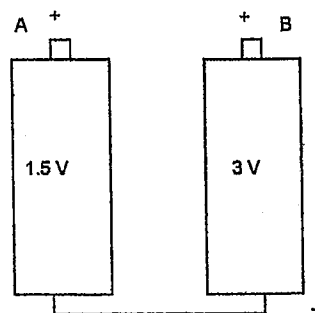
Expérience : effectuer les mesures et noter vos observations (dans le tableau), en particulier l'éclairement des lampes et les comparer à ce qu'il était à la Question I..

Puis lorsque L2 est en panne bien observer ce qui se passe à ses bornes, et pour L1 et tenter une explication : existe-t-il un lien entre d.d.p. et éclairement, pour une même lampe ?

Conclusion de la classe :

- 2 - pour chacun des montages dessinés, répondre aux questions suivantes :
- a - existe-t-il une d.d.p. entre les points A et B ?
- b - la lampe (lorsqu'elle existe sur le schéma) peut-elle s'allumer ?

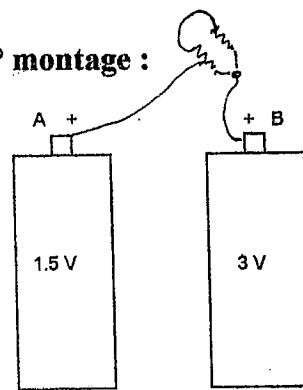
1° montage :



a - $U_{AB} = 0$ oui / non

b - la lampe éclaire ?

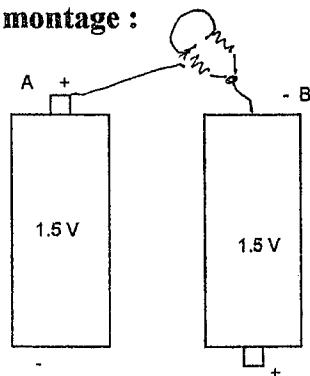
2° montage :



oui / non

oui / non

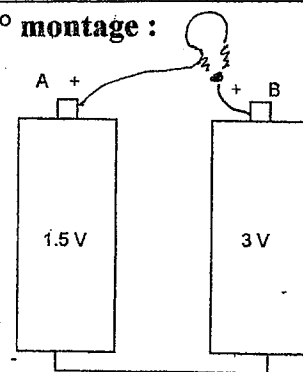
3° montage :



a - $U_{AB} = 0$? oui / non

b - lampe oui / non

4° montage :



oui / non

oui / non

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Effectuer les mesures : comparer aux prévisions ... puis tenter d'interpréter :

- 1 - $U_{AB} =$ V
- 2 - $U_{AB} =$ V
- 3 - $U_{AB} =$ V
- 4 - $U_{AB} =$ V

Conclusions de la classe :

Questionnaire avant l'introduction de la

différence de potentiel

Question I

1 - Dessiner le schéma d'un montage comportant une pile et une ampoule commandée par un interrupteur : il sera fermé puis , dans un deuxième temps, ouvert.

L'alimentation porte l'indication 6V.

2 - Sais-tu s'il existe une différence de potentiel aux bornes des différents éléments ?

Complète le tableau avec tes prévisions, (que tu pourras comparer, en T.P. à des mesures) :

d.d.p. aux bornes de :	prévision :	mesure :	observations :
fil	$U_{\text{fil}} = \text{ V }$		
générateur	$U_{\text{gén}} = \text{ V }$		
ampoule	$U_{\text{amp}} = \text{ V }$		
interrupteur fermé	$U_{\text{int}} = \text{ V }$		
Si l'interrupteur est ouvert :			
fil	$U_{\text{fil}} = \text{ V }$		
générateur	$U_{\text{gén}} = \text{ V }$		
ampoule	$U_{\text{amp}} = \text{ V }$		
interrupteur ouvert	$U_{\text{int}} = \text{ V }$		

3 - Dans ta tête, en t'aidant si besoin des exemples précédents pour répondre ...la différence de potentiel est -elle liée à l'existence :

- de charges + et - ? - d'un courant ? - d'une possibilité d'un échange énergétique ?

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

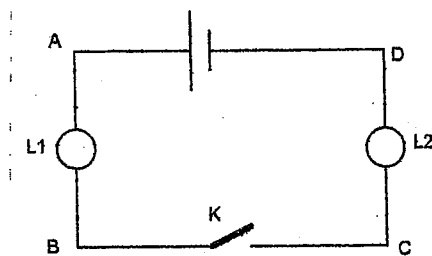
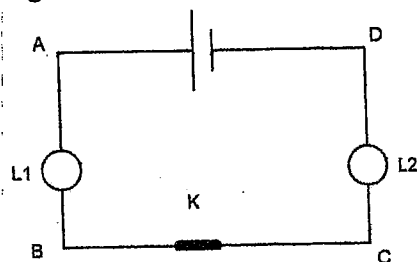
Expérience : si elle te surprend note le vite ... et tente une explication ...

Ma conclusion est :

Conclusion de la classe :

Question II

1 - Au montage précédent, on ajoute une deuxième ampoule, identique à la première. Voici le nouveau montage :



2 - Sauras-tu prévoir les nouvelles d.d.p., l'interrupteur est d'abord fermé, puis ouvert :

Les ampoules éclairent-elles comme au I

d.d.p. aux bornes de :	prévisions :	mesures :
fil	$U_{\text{fil}} = \quad \text{V}$	
générateur	$U_{\text{gén}} = \quad \text{V}$	
ampoule	$U_{\text{amp}} = \quad \text{V}$	
interrupteur fermé	$U_{\text{int}} = \quad \text{V}$	
Si l'interrupteur est ouvert		
fil	$U_{\text{fil}} = \quad \text{V}$	
générateur	$U_{\text{gén}} = \quad \text{V}$	
ampoule	$U_{\text{amp}} = \quad \text{V}$	
interrupteur ouvert	$U_{\text{int}} = \quad \text{V}$	

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Expérience : note vite tes surprises ... et essaie de comprendre ...

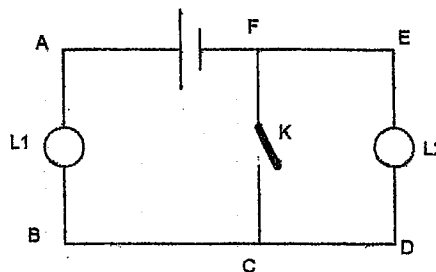
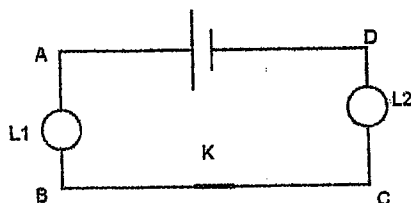
Interprétation : repense à la question 3 du I :

Conclusion de la classe :

Question III : Réinvestissement

1 - Dans le montage de la question II, on déplace l'interrupteur ouvert : il relie maintenant la borne commune des lampes à une borne de la pile :

(rappel question II) :



On demande de prévoir la d.d.p. aux bornes des différents dipôles. Compléter le tableau :
noter vos observations :

	prévision :	mesure :
d.d.p. aux bornes de		
C et F UCF =		
A et F UAF =		
B et C UBC =		
B et A UBA =		
D et E UDE =		

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

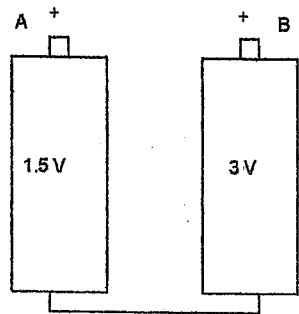
Expérience : effectuer les mesures et noter vos **observations** à côté du tableau, en particulier l'éclairement des lampes et les comparer à ce qu'il était à la Question I..

Existe-t-il un **lien entre d.d.p. et éclairement**, pour une même lampe ?

Conclusion de la classe :

- 2 - pour chacun des montages dessinés, répondre aux questions suivantes :
- a - existe-t-il une d.d.p. entre les points A et B ?
- b - la lampe (lorsqu'elle existe sur le schéma) peut-elle s'allumer ?

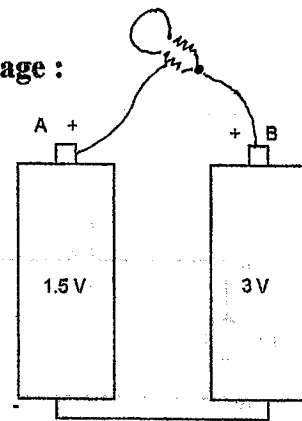
1° montage :



a - $U_{AB} \neq 0$ oui / non

b - la lampe éclaire ?

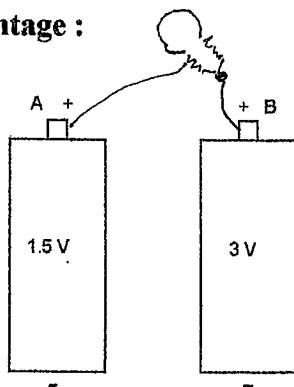
2° montage :



oui / non

oui / non

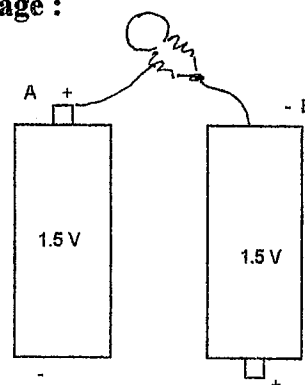
3° montage :



a - $U_{AB} \neq 0$? oui / non

b - lampe oui / non

4° montage :



oui / non

oui / non

Hypothèses à vérifier par l'expérience :

Effectuer les mesures : comparer aux prévisions ... puis tenter d'interpréter :

- 1 - $U_{AB} =$ V
- 2 - $U_{AB} =$ V
- 3 - $U_{AB} =$ V
- 4 - $U_{AB} =$ V

Conclusions de la classe :

2° Etape : différence de potentiel électrique

ou

Tension électrique

Plusieurs différences par rapport à l'enseignement habituel, pour l'approche de ce concept reconnu comme particulièrement difficile, d'autant que l'élève ne le trouve d'aucune utilité ... :

- choix du vocabulaire :

*nous choisissons de le nommer **différence de potentiel** parce que :*

nous pensons à l'analogie avec la différence d'altitude, mais aussi

nous avons repéré les expressions usuelles des élèves dans lesquelles intensité et tension sont interchangeables, ce qui nous apparaît plus difficile avec intensité et d.d.p., par exemple :

"AB reçoit toute la tension qu'envoie le générateur ..." ou :

"le générateur dégage 6V il envoie 6V"

- au niveau du modèle : la d.d.p. est **différente du courant**, comme dans le programme, il peut exister une d.d.p. en l'absence d'un courant, mais en l'absence de d.d.p. il ne peut y avoir de circulation, puisqu'elle sera introduite comme cause de cette circulation (c'est d'ailleurs pourquoi nous tenons à la présenter avant). Pour le reste du modèle, mots, symboles et relations resteront ceux "consacrés".

- nous conseillerons certaines expériences habituellement interdites, comme placer le voltmètre en série dans le circuit, pour mieux différencier les deux concepts.

L'enseignement commence par une étape de familiarisation avant introduction des grandeurs et relations du modèle.

(introduction en partie empruntée à l'article d'A. Tiberghien, G. Arsac et M. Méheut :

"analyse de projets d'enseignement issus de recherches en didactique.")

I / Approches

Rappel :

un circuit est ... *(leur demander de le reformuler ...)* une boucle fermée à l'intérieur de laquelle circulent des charges si ... il y a un ... ? ... " un générateur. Pourquoi ?

Quelle est la cause de ce mouvement ? ... la pile

Plus généralement qu'est-ce qui peut mettre en mouvement ? ... une **force** c'est pourquoi les premiers physiciens de l'électricité, tel Volta, ont été amenés à parler de

la **force électromotrice** (force qui met les électrons en mouvement) de la pile ou f.e.m.

Approche familière :

- chez vous quelle est la force électromotrice du générateur ? Où la trouve-t-on ?

- vous avez été amenés à observer des appareils électriques : ampoules, four, sèche cheveux
...quelle indications communes portent-ils en France ? 220V 50Hz

Ils fonctionnent si cette force électromotrice existe, et ce sont des lieux de transformation d'énergie.

- Elle existe aux bornes des prises de courant : comment feriez-vous le schéma d'un générateur et d'une prise de courant ? ... c'est donc un circuit ouvert ...

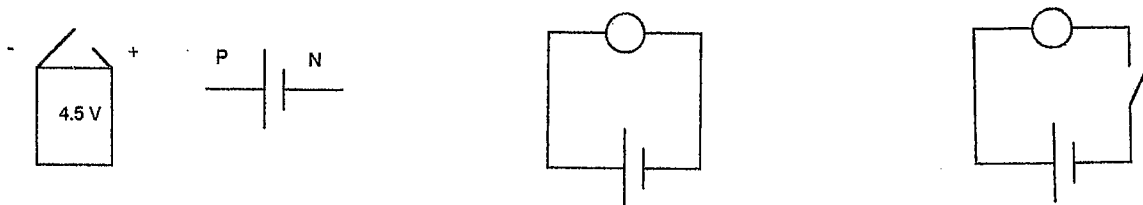
Dans la pièce la lampe éclaire : comment est-elle reliée au générateur ? Compléter le circuit ...

remarque : si un appareil est en panne, cela n'a aucune influence sur les autres : ils sont tous montés en ... dérivation.

Réinvestissement dans le circuit simple : dans un circuit simple, que peut-on prévoir ?

- si la f.e.m. est une propriété du générateur, si elle est attachée au générateur, si elle le caractérise (penser, lors de l'achat d'une pile, êtes-vous attentif aux ampères ou aux volts ?), on peut se poser la question : est-elle constante, quel que soit le montage ?

(1) pile isolée : (2) pile reliée à une ampoule : (3) pile avec circuit ouvert :



- Chez vous la d.d.p. aux bornes des prises de courant est 220 V, ce qui correspond à un circuit ouvert : quelle pourrait être la d.d.p. aux bornes de l'interrupteur ouvert ? et lorsqu'il est fermé auriez-vous une idée ?

- Chez vous la d.d.p. aux bornes des récepteurs semble égale à la f.e.m. du générateur. Que pensez-vous de la d.d.p. aux bornes des fils, qu'ils soient ou non parcourus par un courant électrique ?

- Dans des circuits montés en dérivation, comme à la maison, la f.e.m. du générateur est ... et aux bornes des récepteurs elle est sans doute ... puisqu'ils sont prévus pour fonctionner avec celle là.

Questionnaire avant l'introduction de la différence de potentiel

(à faire remplir, questions 1 et 2)

puis T.P. : expériences et mesures qui doivent permettre d'attribuer des propriétés au concept :

la d.d.p. aux bornes d'un fil est négligeable et sera considérée nulle dans les calculs,
la d.d.p. aux bornes du générateur sera considérée comme constante,
en circuit ouvert, toutes les d.d.p. sont nulles sauf aux bornes du générateur et de l'ouverture du circuit (rappel de la prise de courant)

des dipôles en série se partagent la d.d.p. du générateur : ce sont des diviseurs de tension
des dipôles en dérivation possèdent la même d.d.p. à leurs bornes.

Conclusion : où existe-t-il une d.d.p. : aux bornes de dipôles siège d'un échange énergétique ...

II / Questionnaire (travail en T.P.)

1 - Expériences

- 5 à 10 minutes d'échanges pour réfléchir aux prévisions, les modifier si besoin, puis ...
- mise en commun et repérage des idées, donc des hypothèses en présence à inscrire au tableau :
 -
 -

Pour valider les **hypothèses** des mesures s'imposent :

Rappels : appareil, symbole, place que se passerait-il si on le montait en série ?
à faire si cela intéresse ... unité.

- Réaliser en premier le circuit : pile + ampoule :

a - observations : pile + ampoule

- noter les mesures sur la ligne correspondante du tableau
en faisant très attention aux unités : **V** ou **mV** ?
- dans la dernière colonne repérer la nature du dipôle de chaque tronçon : pile, fil ou ampoule et réfléchir s'il est un lieu d'échange énergétique,
- tenter une première approche à noter dans la conclusion personnelle, **nouvelles hypothèses à tester** lorsque l'ampoule se trouve dévissée :

b - pile + ampoule dévissée

- même travail qu'au -a-, puis
- comparer les valeurs prises aux bornes d'un même dipôle en circuit ouvert ou fermé et repérer celles qui : changent et celles qui restent inchangées.
- en déduire des **propriétés**, à noter dans la conclusion personnelles, **nouvelles hypothèses** pour aborder l'interrupteur ouvert ou fermé :

c - pile + ampoule + interrupteur : même travail qu'au -a- avec d'abord l'interrupteur

- **fermé** : permet de retrouver les résultats du -a- et de conclure que l'interrupteur fermé se comporte comme un fil, puis
- **ouvert** : permet de retrouver les résultats du -b- et de généraliser à l'effet d'une ouverture du circuit, quelle qu'en soit la cause : *en faire trouver d'autres* : ampoule grillée, mauvais contact, fil détérioré ..., coupé, débranché ...
- maintenant quelques **propriétés de la d.d.p.** doivent pouvoir être énoncées :
d.d.p. aux bornes d'un fil du générateur de récepteur non alimentés ...
de l'interrupteur ouvert fermé ...
- ces hypothèses restent présentes lors des expériences suivantes où le circuit s'enrichit d'un deuxième récepteur :

d - 2 ampoules en dérivation aux bornes de la pile

- si L2 est en panne ABCF est le circuit -a- ou -c- interrupteur fermé et CDEF le circuit -b- ou -c- interrupteur ouvert, occasion donc de nombreux réinvestissements.

(lorsque les 2 ampoules éclairent, certains seront étonnés de constater qu'elles éclairent aussi bien que si chacune avait une pile pour elle seule : ils sont très nombreux à prévoir que, dans ce cas, les ampoules "se partagent le courant de la pile". C'est donc une observation importante à noter et à tenter d'interpréter, en lien avec la mesure des d.d.p.)

- lorsque les 3 dipôles sont reliés observer les d.d.p. à leurs bornes : c'est une propriété importante, qui pourra même devenir un moyen électrique de reconnaître les dipôles montés en dérivation.

e - 2 ampoules en série avec la pile

Bien observer le nouvel éclairement des ampoules ainsi que la d.d.p. à leurs bornes : en tirer une loi de la d.d.p. pour des dipôles montés **en série**, à vérifier si besoin avec trois ampoules, même si elles n'éclairent plus.

Placer, ensuite, l'interrupteur en dérivation aux bornes d'une ampoule, ... résultat surprenant ... par rapport au -b- et -c- mais occasion de :

- réinvestir la loi en série et de
- préciser quelle **d.d.p.** se trouve aux bornes d'un interrupteur **ouvert** : qu'ils ne mémorisent pas sans réfléchir que c'est celle du générateur quoiqu'il arrive.

2 - Conclusions : propriétés de la d.d.p.

leur demander de reformuler ce qu'ils ont découvert, à l'occasion de ces expériences : la d.d.p.

- est une grandeur **algébrique** $U_{PN} = - U_{NP}$ $U_{AB} = - U_{BA}$
- aux bornes du **générateur** est considérée **constante**, pour l'instant, *on précisera plus loin ...*
- aux bornes d'un **fil** sera **négligée**, en sachant qu'elle n'est pas tout à fait nulle ...
- aux bornes d'un **interrupteur** est :
 - négligeable si le circuit est fermé : il se comporte comme un fil
 - au contraire, en circuit ouvert, c'est celle du dipôle à ses bornes, qui peut être le générateur !
- aux bornes de l'**ampoule**, dépend du circuit :
 - est nulle en circuit ouvert
 - est celle du générateur si l'ampoule est reliée à ses bornes, qu'elle y soit seule, ou qu'il y en ait plusieurs, en dérivation, d'ailleurs elles éclairent toutes aussi bien.
 - est partagée entre les dipôles montés en série, partage qui dépend de la nature des dipôles (là les lampes éclairent peu) :

**des dipôles en série sont des diviseurs de la d.d.p., alors que
des dipôles qui ont la même d.d.p. à leurs bornes sont montés en dérivation.**

III / Analogie, choisie en mécanique, pour comprendre

1 - Analogie gravifique

En introduction, on avait dit que la pile possédait une force qui mettait les électrons du circuit en mouvement. Or, dans la vie de tous les jours, **pour qu'un corps se mette en mouvement**, apparemment tout seul, il faut :

en mécanique	en électricité
- un passage possible - une différence d'altitude	- un circuit fermé et - une différence de potentiel différence d'état électrique $V_P - V_N$

$$Z_2 - Z_1$$

plus elle est grande, plus ...

....

à une altitude Z

correspond

un potentiel électrique V

dans les deux cas, **peu importe le choix du zéro**, seule la **différence importe** : exemple un puits ...

$$h_{AB} = Z_A - Z_B$$

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

ce sont toutes deux des **grandeurs algébriques** :

$$h_{AB} = -h_{BA}$$

$$U_{AB} = -U_{BA}$$

remarque : notation en utilisant des indices avec deux lettres tel U_{AB} et surtout pas un chiffre tel U_1 , pour bien marquer que l'on s'intéresse à ce qui se passe entre deux points du circuit.

2 - Utilisation

Que nous permet-elle de comprendre ?

Que nous permet-elle de prévoir ?

Nous avons établi un parallélisme entre différence d'altitude et différence de potentiel :

- l'**existence d'une différence d'altitude**, comme l'**existence d'une d.d.p.**, par similitude permet de prévoir une éventuelle :

transformation d'énergie, ... et une **mise en mouvement**.

a - rôle du générateur

Il maintient une différence de potentiel électrique, c'est à dire une différence d'altitude électrique entre ses bornes :

- si le circuit est ouvert, aucun mouvement possible, aucune transformation d'énergie possible
- si le circuit est fermé, le mouvement devient possible, il y a transformation d'énergie au sein du générateur, énergie transférée, par la chaîne conductrice, aux récepteurs.

On peut imaginer de représenter une d.d.p. par une différence d'altitude :



Application : retour aux schémas p. 34 + expériences T.P. p.35

1 - Cette différence entre ses bornes existe-t-elle si les bornes :

- ne sont reliées à rien ?
- sont reliées à un circuit ouvert ?
- sont reliées à un circuit fermé ?

conclusion :

l'existence d'une différence d'altitude ne dit pas s'il existe un chemin, s'il est praticable ...
la différence de potentiel existe, persiste égale à elle-même, qu'une circulation soit ou non imaginable ...

circuit fermé, ouvert, absent ... $U_{PN} = \text{constante} = V_P - V_N$

2 - La différence de potentiel est une **grandeur algébrique** :

- la borne P est à un potentiel plus élevé que, supérieur à la borne N se traduit par :

$$V_P - V_N > 0 \quad \text{ou :}$$

- la borne N est à un potentiel moins élevé que, inférieur à la borne P :

$$V_N - V_P < 0$$

Utilisation : dans un circuit, tu mesures la d.d.p. entre deux points A et B et tu trouves :

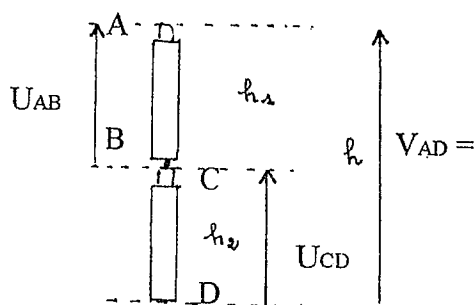
$$U_{AB} = V_A - V_B < 0$$

que peux-tu dire au sujet de ces deux d.d.p. ?

b - Association de générateurs

- en série

- en opposition



Utilise la propriété que le potentiel est une grandeur algébrique :

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{CD}$$

et :

$$U_{BD} = U_{BA} + U_{CD} = -U_{AB} + U_{CD}$$

et si $U_{AB} = U_{CD}$, alors :

$$U_{BD} = 0$$

application pratique : lorsqu'un appareil nécessite une d.d.p. de 4,5 V fournie par trois piles de 1,5 V, ne faut-il pas faire attention à quelque chose ? ... Pourquoi ?

Il arrive aussi que les piles soient montées autrement, par exemple dans les voitures télécommandées ... Quel est ce montage ? ... Quel est son intérêt ? ...

les piles sont **montées en parallèle** ...

On dispose d'une plus grande réserve d'énergie, la voiture peut donc fonctionner plus longtemps.

c - circuit avec un seul dipôle récepteur

- repartir du T.P. p. 27 ou 30
 - à partir des mesures, tracer le diagramme d'altitude sur ces trois exemples, c'est à dire : schématiser toutes les d.d.p. :

- par une flèche verticale, dirigée vers le haut pour une valeur positive (altitude positive), et vers le bas pour une valeur négative,

- en prenant pour échelle de représentation 1 cm pour 1 Volt.

réaliser avec eux le premier, ils essaient seuls le deuxième et tous tracent seuls le troisième.

Exemples :

- question I p.27

- question I p.30 :

- interrupteur AB fermé

- interrupteur ouvert

schéma :

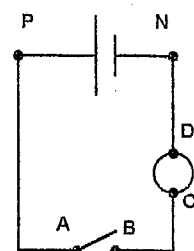
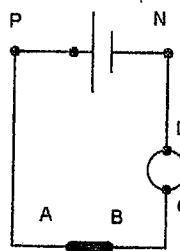
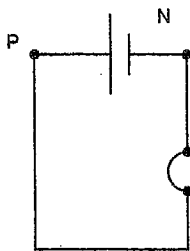
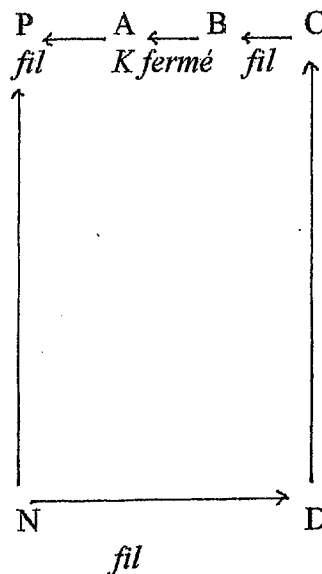
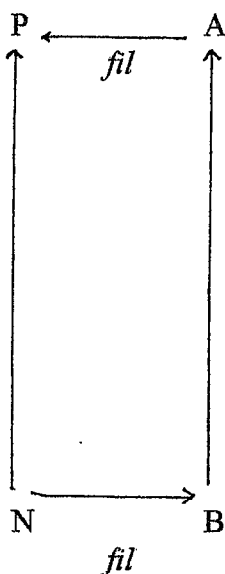
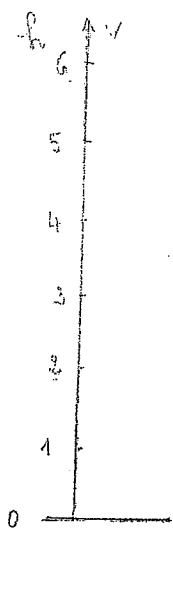


diagramme d'altitude correspondant :



- quelles égalités apparaissent ? Les confronter à la conclusion tirée en T.P.

Conclusion : comment se répartissent les d.d.p. le long de ce circuit ? Observons sur les exemples :
si possible essayer qu'elles viennent des élèves

1 - circuit pile - ampoule

On retrouve que :

- c'est une grandeur algébrique

- la d.d.p. aux bornes d'un fil pourra être négligée

- la d.d.p. aux bornes du récepteur est égale à celle aux bornes du générateur, dans

ce circuit où le récepteur est relié au générateur uniquement par des fils. (conclusion à ne pas généraliser abusivement à n'importe quel circuit ...)

2 - circuit pile - ampoule - interrupteur fermé

On retrouve les conclusions précédentes auxquelles on peut ajouter que :

- la d.d.p. aux bornes d'un interrupteur fermé est comparable à celle aux bornes d'un fil, et donc pourra être négligée ...

3 - circuit pile - ampoule - interrupteur ouvert

dans ce cas la d.d.p. aux bornes :

- du récepteur est nulle en circuit ouvert (sinon ce serait un ... leur faire trouver ... générateur)
- de l'interrupteur ouvert est égale à celle du générateur : **conclusion à ne pas généraliser**, retenir qu'elle est importante, sa valeur étant à analyser en fonction du circuit ...

d - circuit série

- repartir du schéma du T.P. p. 31

1 - K fermé

- à partir des mesures tracer le diagramme d'altitude : des égalités apparaissent : les confronter à la conclusion tirée en T.P. : comment se répartissent les d.d.p. le long d'un circuit série ?

On retrouve que la d.d.p. :

- est une grandeur algébrique
 - aux bornes d'un fil pourra être négligée
 - aux bornes du générateur est répartie aux bornes des récepteurs :
- si on fait le tour du circuit, on s'est déplacé en altitude, pour revenir à l'altitude de départ :
- la somme algébrique des variations d'altitude est nulle
 - la somme algébrique des différences de potentiel est aussi nulle.

rappel :

autre interprétation : *plus il y a de lampes, moins elles éclairent, chacune étant un frein à la circulation*

remarque :

On a observé l'éclairement de l'ampoule :

- si la d.d.p. à ses bornes est 6V son éclairement est ...
- si c'est 3V son éclairement devient ...

A une d.d.p. plus faible correspond (pour un même dipôle) un échange énergétique inférieur :
d.d.p. et échange énergétique ont un lien.

2 - K ouvert

c'est un réinvestissement, à faire chez eux :

à partir des mesures :

- tracer le diagramme d'altitude
- écrire la relation algébrique entre les d.d.p. aux bornes des dipôles du circuit série
- noter les d.d.p. aux bornes :
 - du générateur
 - des fils
 - de l'interrupteur ouvert.

en cours : loi (ce serait bien qu'elle vienne d'eux)

Dans une maille, la somme algébrique des d.d.p. est nulle :

$$U_{AA} = 0 \quad (h_{AA} = 0) \quad \text{ou :} \quad U_{PN} = U_{PA} + U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DN}$$

$U_{PN} = \text{Constante}$ $h_{PN} = \text{constante}$ **quelque soit le chemin suivi**

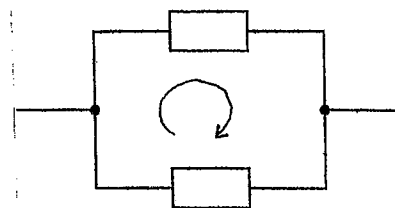
Remarques :

- comment reconnaître des dipôles montés en série :

par l'absence de noeud entre eux

(certains élèves considèrent les dipôles de deux branches dérivées, comme montés en série entre eux, et font tourner le courant à l'intérieur de la boucle ainsi formée).

remarque : que se passe-t-il si l'un est en panne ?



- comment éclairent deux ampoules identiques montées en série ?

pareil et faiblement

Pourquoi ? Quelle est la d.d.p. à leurs bornes ?

égale et égale à la moitié de celle du générateur.

- des dipôles montés en série sont des diviseurs de d.d.p. : ils se partagent celle du générateur

- sens du courant :

- si c'était de l'eau, son mouvement naturel serait du haut vers le bas, de l'altitude la plus élevée vers la plus basse et elle pourrait fournir de l'énergie aux turbines, aux moulins ...

- de même le **courant électrique** dans la portion de circuit **extérieure** au **générateur**, **descend les potentiels**, se dirige du plus élevé symbolisé par la borne + du générateur vers la plus basse, borne -. Les charges + qui dégringolent les potentiels, libèrent de l'énergie transmise aux récepteurs. Il **remonte** les potentiels **à l'intérieur du générateur**.

e - circuit avec dérivation

Partir d'un schéma, tel p. 21 du questionnaire (évaluation circuit - circulation)

Peut être un simple réinvestissement du -c- circuit avec un seul dipôle récepteur, en le traitant maille par maille, avec l'aide de l'analogie gravifique, avec ou sans (selon que c'est vécu comme une aide ou une contrainte inutile) le schéma des altitudes.

Tenter une comparaison de la d.d.p. aux bornes des différents dipôles ainsi montés ? Leur nature a-t-elle une influence ?

Conclure : prévoir l'éclairement de lampes identiques ainsi branchées ... chacune éclaire comme ayant la pile pour elle toute seule ... , elles éclairent pareil : elles ont la même d.d.p. à leurs bornes. De plus c'est celle du générateur, donc elles éclaireront bien.

Conclusion : **Loi** (tenter de la leur faire trouver, et éviter tout énoncé du genre :

"deux ampoules en dérivation possèdent la d.d.p. du générateur",

sans doute rencontré au collège sur une simple dérivation de deux lampes avec une pile, et qu'ils continuent à utiliser sur un montage comportant un dipôle en série avec la dérivation ...)

Des dipôles montés en dérivation possèdent la même d.d.p. à leurs bornes.

Application chez vous :

- les différents appareils électriques : ampoules, prises, ... sont-ils montés en série ou en dérivation ? ... Pourquoi, qu'est-ce qui te permet de répondre ?

- quel est l'effet d'une ampoule est dévissée, ou grillée sur les autres ?

- quel est l'effet, si on relie un dipôle à une prise, au niveau des autres ?

Même questions si les dipôles étaient branchés suivant l'autre montage évoqué ...

Conclusion : les appareils électriques domestiques sont montés en dérivation : ils se comportent comme s'ils appartenait à des circuits indépendants.

IV / La d.d.p. entre deux points

1 - Concept de d.d.p.

a - Définition

L'existence d'une d.d.p. entre deux points A et B, indique que ces deux points A et B ne sont pas au même potentiel électrique, dans le même état électrique, (à la même "altitude électrique"), l'un possède un potentiel plus élevé que l'autre.

b - Applications : cela permet d'expliquer :

b - 1 - le rôle électromoteur du générateur :

Il existe toujours la même d.d.p. entre ses bornes, la même possibilité de mise en mouvement des charges. Nous verrons qu'un générateur est caractérisé par sa force électromotrice E (force de mise en mouvement des charges électriques ou f.e.m. E)

Leur association en série permet d'additionner leurs forces électromotrices : les "hauteurs de chute" s'additionnent, ce qui permet des échanges énergétiques plus grands, un mouvement des charges plus rapide ...

Leur association en parallèle, ne modifie pas la hauteur de chute, l'éclairement des lampes restera le même, mais la durée de l'échange sera supérieur, proportionnelle à la quantité d'énergie mise en réserve.

b - 2 - le rôle des fils :

Il y a possibilité d'une circulation de charges électriques entre deux points A et B d'un circuit, s'il existe un chemin qui relie A et B. En effet, comme :

l'existence d'une différence d'altitude n'implique pas une chute,

l'existence d'une d.d.p. n'implique pas l'existence d'un courant : exemples (*à faire trouver*)
générateur isolé K ouvert led à contre-sens ampoule grillée ...

Une faible différence d'altitude (considérée nulle), ne signifie pas absence de chemin et donc d'une circulation : exemples (*à demander*)

fils et K fermé

Nous avons constaté que les extrémités d'un fil sont généralement à des potentiels voisins : la d.d.p. à leurs bornes est faible, à l'échelle du montage, négligeable, pourquoi ?

Les fils sont des dipôles ayant généralement une résistance faible (faible frein) à la circulation du courant : elle est proportionnelle à leur longueur et inversement proportionnelle à leur section (nos fils sont courts, comparés à ceux de l'EDF dont 13% de la production constitue des pertes en ligne)

...

A résistance faible, d.d.p. faible, si la résistance s'élève, la d.d.p. s'élève ...

Remarque : il arrive que la d.d.p. aux bornes d'un fil ne soit plus du tout négligeable ... voire même égale à celle du générateur : c'est le ... **court-circuit** :

si la d.d.p. est importante, l'échange énergétique au niveau du fil n'est plus du tout négligeable et son échauffement peut être source de dégâts ...

- le sens de cette circulation sera spontanément du ... haut vers le bas, du + vers le -

b - 3 - le comportement de l'interrupteur

Fermé, il se comporte comme un fil : $U_K = 0$. La possibilité d'échange énergétique entre ses bornes et le milieu extérieur est négligeable ...

Ouvert, la d.d.p. peut être celle du générateur, un échange énergétique plus ou moins intense devient possible : une ampoule reliée à ses bornes doit pouvoir éclairer ... (*prise de courant ?*)

b - 4 - récepteur et échange énergétique

En mécanique, un échange énergétique est possible sitôt qu'il existe une différence d'altitude, par exemple. De même, en électricité, dès lors qu'il existe une différence d'état électrique, une **différence de potentiel** électrique et un **chemin conducteur** pour les charges électriques l'échange énergétique devient possible :

en l'absence de chemin aucun échange possible, de même en l'absence de d.d.p.

s'il existe une d.d.p. et un chemin, en dégringolant les potentiels, les charges libèrent de l'énergie :

si c'est un fil, c'est le court-circuit dangereux, car trop d'énergie libérée en trop peu de temps

si c'est un récepteur, l'échange dépend de sa nature, de ses caractéristiques, de la d.d.p. à ses bornes ... exemples : (*leur faire trouver, à l'aide des exemples traités avant, ou au moins terminer les phrases*)

deux récepteurs identiques soumis à la même d.d.p., subissent la même "hauteur de chute", sont le siège ... du même échange énergétique

(deux lampes identiques qui ont la même d.d.p. à leurs bornes éclairent pareil)

deux récepteurs identiques soumis à des d.d.p. différentes, seront le siège d'un échange énergétique d'autant plus important que ...

(si on élève la d.d.p. aux bornes d'une lampe elle éclairera ... car elle sera le siège d'un échange énergétique ...)

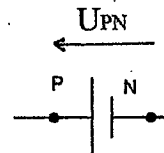
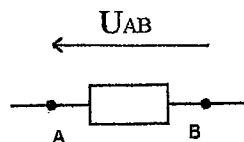
Application : retour sur les schémas des pages 19 - 20 pour essayer de prévoir :

- quelles lampes éclairent normalement ?
- quelles lampes ont un éclairage faible ?
- y-a-t-il des lampes pour lesquelles vous ne savez pas dire ?

c - Représentation

On note une d.d.p., ou tension électrique, en utilisant les conventions suivantes :

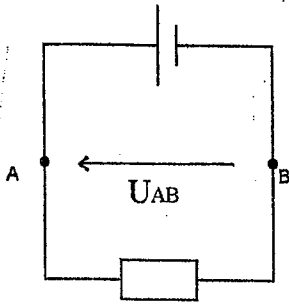
- la d.d.p. entre deux points A et B d'un circuit est notée $U_{AB} = V_A - V_B$
- elle est représentée par un segment fléché orienté de B vers A :



Utilisation : représenter les d.d.p. U_{AB} , U_{CB} , U_{AC} :



Remarque : circuit fermé :



Le courant :

- descend la "montagne"
les potentiels à l'extérieur du générateur
- les remonte à l'intérieur

c'est lié au sens des échanges énergétiques :
ce que le "courant" a reçu à l'intérieur du générateur, il le transfère aux récepteurs à l'extérieur.

2 - Propriétés de la différence de potentiel entre eux points

à faire reformuler, à partir

- du rappel des mesures,

- du travail avec l'analogie ..

puis réécrire dans le cours et chez eux sur leurs fiches mémoire, si ce n'est déjà fait ...

a - dipôles montés en série

a - 1 - Loi :

Dans une maille, la somme algébrique des d.d.p. est nulle.

ce qui peut s'écrire : $U_{PN} = U_{PA} + U_{AB} + U_{BC} + \dots + U_{FG} + U_{GN}$

ou : $U_{PN} + U_{NG} + U_{GF} + \dots + U_{CB} + U_{BA} + U_{AP} = 0$

a - 2 - applications

rappels :

- au circuit simple - au circuit série - l'interrupteur étant ouvert ou fermé
- que se passe-t-il si on monte une ampoule portant l'indication 1,5 V aux bornes d'une pile neuve portant l'indication 4,5 V ?

le potentiomètre :

On avait déjà dit que des **dipôles montés en série** se comportaient comme des **diviseurs de la d.d.p**

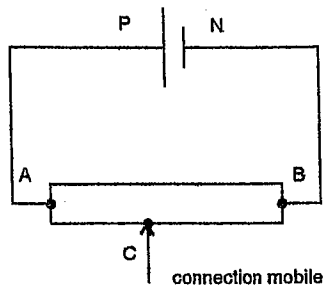
- comment obtenir une d.d.p. moitié de celle aux bornes du générateur ?
- comment en obtenir une égale au quart ? au dixième ?

Il y a un moyen, qui permet avec un seul dipôle relié à un seul générateur d'obtenir toutes les valeurs imaginables de d.d.p. entre deux points, en utilisant la propriété :

à résistance faible, faible d.d.p., aux bornes des différents dipôles d'un circuit série donné (exemple du fil)

Ce dipôle, appelé potentiomètre est une résistance variable réglable :

- si la résistance utilisée est faible, voire nulle, la d.d.p. sera faible, voire nulle
- si on élève la résistance, la d.d.p. disponible s'élèvera ...



$$U_{AB} = U_{PN}$$

$$U_{AA} \leq U_{AC} \leq U_{AB}$$

$$0 \leq U_{AC} \leq U_{PN}$$

b - dipôles montés en dérivation

b - 1 - Loi

Des dipôles montés en dérivation possèdent la même d.d.p. entre leurs bornes. (ce qui peut paraître évident, leurs bornes étant reliées entre elles, elles sont deux à deux au même potentiel ... si ce sont les élèves qui arrivent à cette remarque, c'est qu'ils ont bien compris !)

Remarque :

A quoi reconnaissez-vous un montage en dérivation ?

(le plus souvent, c'est en s'appuyant sur des critères géométriques, susceptibles d'induire en erreur ..)

Maintenant, on peut donner une **définition électrique** de dipôles montés en dérivation (ou en parallèle) :

ils possèdent la même d.d.p. entre leurs bornes.

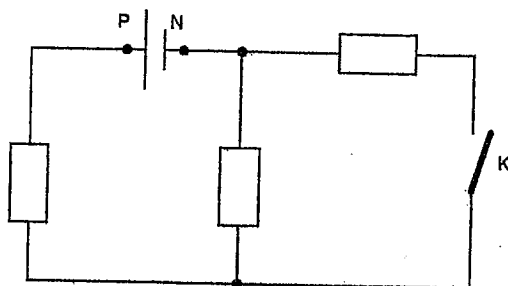
b - 2 - applications

- Rechercher sur les montages des p.19-20 les dipôles en dérivation, puis en se rappelant le travail de la page précédente, décrire électriquement chacun des montages.

- Des lampes identiques montées en dérivation ont une même d.d.p. entre leurs bornes, elles sont le siège d'un même échange énergétique : elles éclairent pareil.

b - 3 - cas de l'ouverture d'un circuit

Voici le schéma d'un circuit possédant trois dipôles identiques et un interrupteur ouvert :



Chercher entre quels points de ce circuit la d.d.p. est :

- nulle
- égale à celle du générateur = U_{PN}
- moitié de celle du générateur = $U_{PN} / 2$

(l'interrupteur ouvert est souvent considéré comme ayant la d.d.p. du générateur entre ses bornes ... le circuit fermé restant possède deux récepteurs géométriquement parallèles, seront-ils lus comme montés en série ?)

V / Réinvestissement

Distribuer, en cours, les questionnaires réinvestissement, p.29-30 ou 33-34, soit deux pages par élève, dont l'une est commune, issue d'un travail de recherche (A. Benséghir)

(Il a toujours été prévu deux questionnaires ou tests proches, afin qu'entre voisins ils aient un texte différent, qu'ils fassent l'effort de réfléchir, que l'on ait accès à leurs représentations, afin de prendre en compte au maximum toutes les hypothèses présentes dans la classe.)

Le but de cette partie, réinvestissement, en proposant des circuits,
- ressemblant aux circuits types du cours / T.P. précédent, est de donner l'occasion à l'élève de vérifier s'il a compris, ou enfin de comprendre et à l'enseignant d'observer, sans la sanction de la note, dans quelle mesure l'élève s'est approprié la connaissance nouvelle, et éventuellement d'envisager des aides
- évoluant vers l'inconnu, est de conduire l'élève à aborder cet inconnu à partir du connu, en respectant bien les lois découvertes ... c'est à dire à prendre conscience de l'utilité du concept, de son domaine de validité, de ses propriétés ... c'est à dire de préciser ses connaissances.

But des questions posées en réinvestissement :

La question III - 1 - de l'un des sujets, p.29, est un circuit comportant trois dipôles en dérivation, circuit évoluant avec la lampe L2 qui tombe en panne (filament coupé), occasion de rappeler que :
cela ne change rien pour l'autre, dans un montage en dérivation, et que,
bien qu'en panne, elle a toujours la même d.d.p. à ses bornes, il ne manque qu'un chemin pour que le courant circule ...

La question III - 1 - de l'autre sujet, p.33, est un simple circuit série, avec un interrupteur ouvert aux bornes de l'une des lampes, occasion de renforcer l'idée que la d.d.p. aux bornes d'un interrupteur ouvert est égale à celle qui est aux bornes du dipôle auquel il est branché, et donc peut être différente de la d.d.p. aux bornes du générateur...

La question III - 2 - est commune : c'est une présentation inhabituelle de l'association de générateurs en série ou en opposition. Le but de ce questionnaire était de détacher l'existence d'une d.d.p. de l'existence de bornes de signes contraires :

il peut exister une d.d.p. entre deux bornes +, tout comme il peut ne pas en exister entre une + et une - si elles se trouvent reliées par un fil (le filament de l'ampoule) qui les met au même potentiel ...

mais, à l'usage, c'est aussi l'occasion de retrouver des élèves pour prévoir l'éclairement d'une ampoule, en circuit ouvert, dès l'instant où ils prévoient l'existence d'une d.d.p. ... et donc l'occasion de revenir sur le concept de circuit ...

T.P. Réinvestissement

A gérer avec les étapes habituelles, page après page :

- 5 à 10 min. d'échanges ...
- mise en commun des prévisions, élaboration des **hypothèses** à écrire au tableau et sur les feuilles
- en **déduire les expériences** à faire pour les valider
- **observations** à noter
- **interprétations** à rechercher ... à l'aide du **modèle** construit en cours ? ... ou à rappeler pour arriver à la **conclusion** de la classe, à leur faire formuler avant de l'écrire sur feuille et tableau ...

Pour le questionnaire de A.Benséghir, il peut être utile pour certains élèves de

- dessiner un diagramme d'altitude, et pour d'autres
- de placer un fil pour relier les bornes lorsqu'elles ne le sont pas : alors l'ampoule éclaire et son fonctionnement permet à certains de comprendre ce qui, avant, faisait qu'elle n'éclairait pas ...

On peut, en plus, pour des élèves encore en difficulté, leur demander de réfléchir chez eux, puis en module ou en entretien, sur un schéma tel que celui de la question II de l'évaluation circuit / circulation (p.22 ou p.25), à la d.d.p. aux bornes des différents dipôles interrupteurs fermés puis en ouvrant 1 ou 2 ou 3 interrupteurs ...

Conclusions

La d.d.p. aux bornes de dipôles en dérivation est égale, mais

elle peut être égale ou différente de celle du générateur.

La d.d.p. aux bornes d'un interrupteur ouvert, comme la d.d.p. aux bornes d'une lampe grillée, est différente de zéro : elle peut être égale ou différente de celle du générateur.

La d.d.p. aux bornes de l'interrupteur fermé est comparable à celle aux bornes d'un fil : nous la considérerons négligeable.

Il peut exister une d.d.p. entre les deux bornes positives de deux piles si :

leurs bornes négatives sont reliées, et si

la d.d.p. de chacune a une valeur différente (piles montées en opposition).

Il peut ne pas exister de d.d.p. entre les bornes de signes contraires de deux piles si :

elles sont reliées par un conducteur, et si :

leurs deux autres bornes sont isolées. Si on les relie, on aura un montage en série ...

Il peut être utile de rechercher des exercices du livre ... occasions de réinvestissements avec des textes plus classiques....

avant de passer à l'évaluation de l'acquisition du concept de d.d.p. : 2 sujets différents à proposer entre voisins : p.50-51 ou 52-53.

Correction de l'évaluation :

- s'il y a des parties bien comprises, on peut imaginer de les traiter comme une simple correction d'exercice, ce qui peut s'imaginer avec des interactions fructueuses entre élèves ayant "réussi" et les autres à l'échelle de la classe avec des expériences intellectuelles à partir des réponses proposées, ou des expériences magistrales ... afin qu'ils n'aient pas l'impression de perdre leur temps, qu'ils restent actifs ;

- si, au contraire des parties semblent dans l'ensemble à reprendre, alors il apparaît souhaitable de les traiter comme un questionnaire, de préférence en T.P., où les interactions se font par groupe de 4 élèves, ce qui permet une meilleure prise en compte de toutes les hypothèses en présence, puis conception et réalisation de l'expérience de validation, observation et interprétation ...

Dans tous les cas, il doit y avoir, si possible venant des élèves, **rappel du modèle** et de ses propriétés lorsque le besoin s'en fait sentir. En effet, il apparaît comme très difficile de faire acquérir aux élèves de ce niveau une **démarche dite "scientifique"**, à savoir, qu'à une question posée, ils fassent le détour par la loi ou le modèle du physicien ... avant d'apporter une réponse.

Puis distribuer le **questionnaire préliminaire à l'intensité** (Questionnaire établi par J.L.Closset), soit 4 pages, avec les conseils habituels de bienexpliquer ... (voir p.3).

EVALUATION d. d. p.

I - Tracer le schéma d'un circuit, avec deux ampoules L_1 et L_2 identiques qui possèdent à leurs bornes la d.d.p. du générateur, soit 6 V

1 - Comparer leur éclairement :

L_1 éclaire plus fort
 pareil que L_2 car ...
 moins fort

2 - L_1 éclaire-t-elle pareil ou moins bien que s'il n'y avait pas L_2 ?

Elle éclaire ... bien car ...

3 - L_1 grille : que vaut alors la d.d.p. aux bornes des lampes :

$U_{L1} =$ V
 $U_{L2} =$ V

Conclusion : L_2 éclairera beaucoup plus pareil n'éclairera pas
car ...

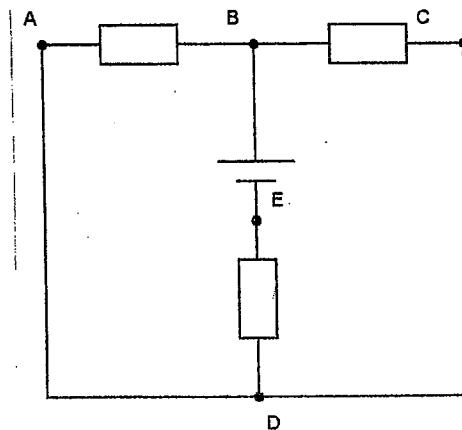
4 - On relie les bornes de L_1 par un fil : que valent alors les d.d.p. :

$U_{L1} =$ V
 $U_{L2} =$ V

car ...

Remarque : Quel danger représenterait ce nouveau montage (ne pas le réaliser !) ?

II / Voici le schéma d'un circuit :



1 - Choisis deux dipôles montés en série :

a - Enonce la loi qui permet de relier les d.d.p. aux bornes des différents dipôles :

b - Ecris la relation algébrique qui en découle :

2 - Choisis deux dipôles montés en dérivation :

a - Enonce la loi qui permet de relier les d.d.p. aux bornes de ces dipôles :

b - Ecris la relation algébrique qui en découle :

3 - Le dipôle AB est maintenant une diode.

Le sens du courant est fléché.

Les dipôles BC et ED sont deux lampes identiques.

La d.d.p. aux bornes du générateur est 5,8 V.

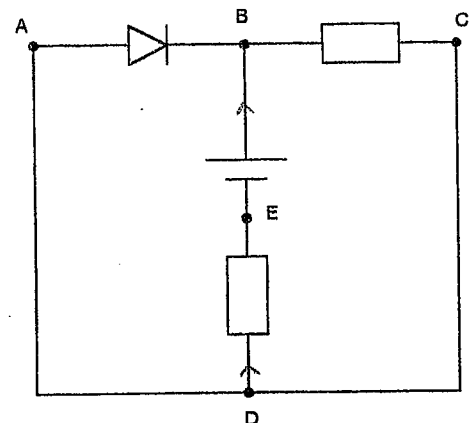
Que prévois-tu comme d.d.p. aux bornes de :

$U_{AB} =$ V car ...

$U_{BC} =$ V car ...

$U_{ED} =$ V car ...

$U_{CD} =$ V car ...



On retourne la diode, dont la tension de seuil est $U_s = 0,8$ V. Reprends les prévisions précédentes et explique celles qui vont se trouver modifiées :

$U_{AB} =$ V

$U_{BC} =$ V

$U_{ED} =$ V

$U_{CD} =$ V

EVALUATION d. d. p.

I - Tracer le schéma d'un circuit, avec deux ampoules L_1 et L_2 identiques qui se partagent la d.d.p. qui existe aux bornes du générateur, soit 12 V

1 - Que vaut la d.d.p. aux bornes des lampes :

$$\begin{array}{l} U_{L1} = \quad V \\ U_{L2} = \quad V \end{array}$$

Comparer leur éclairement :

L_1 éclaire plus fort
 pareil que L_2 car ...
 moins fort

2 - L_1 éclaire-t-elle pareil ou moins bien que s'il n'y avait pas L_2 ?

Elle éclaire ... bien car ...

3 - L_1 grille : que vaut alors la d.d.p. aux bornes des lampes :

$$\begin{array}{l} U_{L1} = \quad V \\ U_{L2} = \quad V \end{array}$$

Conclusion : L_2 éclairera beaucoup plus pareil n'éclairera pas
car ...

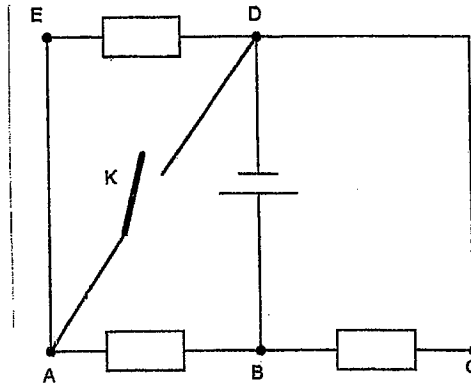
4 - On relie les bornes de L_1 par un fil : que valent alors les d.d.p. :

$$\begin{array}{l} U_{L1} = \quad V \\ U_{L2} = \quad V \end{array}$$

car ...

Remarque : Quel danger pourrait représenter ce nouveau montage (ne pas le réaliser !) ?

II / Voici le schéma d'un circuit :



1 - Choisis deux dipôles montés en série :

a - Enonce la loi qui permet de relier les d.d.p. aux bornes des différents dipôles :

b - Ecris la relation algébrique qui en découle :

2 - Choisis deux dipôles montés en dérivation :

a - Enonce la loi qui permet de relier les d.d.p. aux bornes de ces dipôles :

b - Ecris la relation algébrique qui en découle :

3 - Les dipôles AB, BC et ED sont trois ampoules identiques. La d.d.p. aux bornes du générateur est 4,5 V. Que prévois-tu comme d.d.p. aux bornes de :

$U_{AB} =$ V car ...

$U_{BC} =$ V car ...

$U_{ED} =$ V car ...

$U_{AD} =$ V car ...

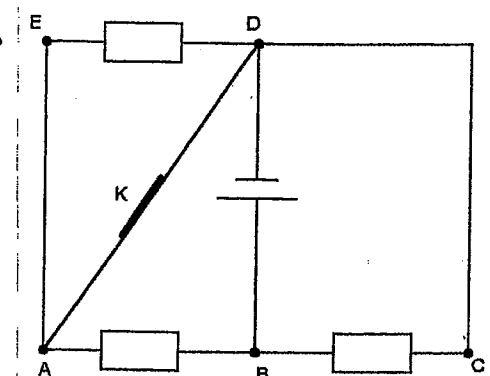
Si on ferme l'interrupteur quelles modifications prévois-tu ?

$U_{AB} =$ V car ...

$U_{BC} =$ V car ...

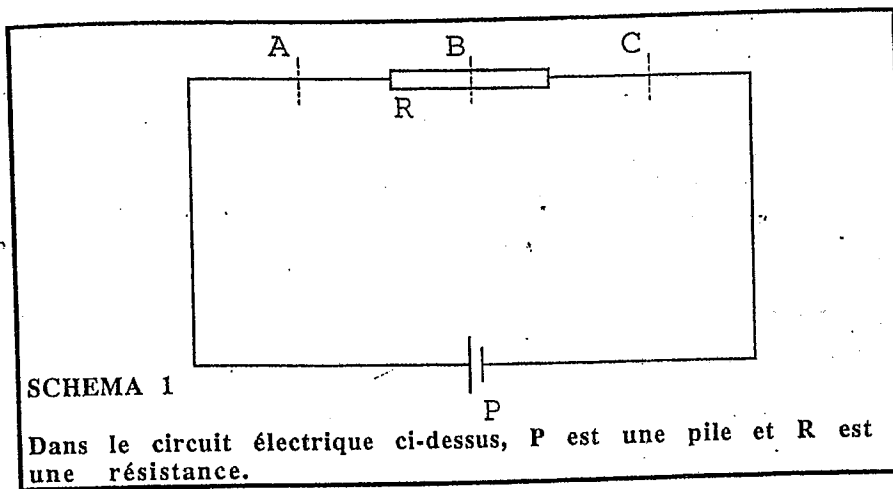
$U_{ED} =$ V car ...

$U_{AD} =$ V car ...



QUESTIONNAIRE

avant enseignement de l'intensité



Q1/a, b, c		Cochez la réponse correcte
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en B
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en C
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en C

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

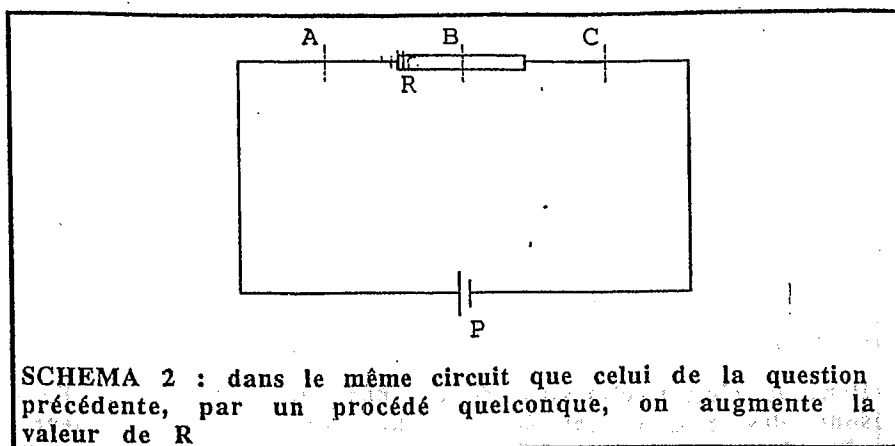
Quelle hypothèse as-tu envie de vérifier par l'expérience :

Expérience :

Conclusion que je tire :

Conclusion de la classe :

Question II



Q2 a, b, c			Cochez la réponse correcte
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en A dans le premier cas	
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en B dans le premier cas	
L'intensité de courant en C est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	ce qu'elle était en C dans le premier cas	

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Quelles hypothèses as-tu envie de vérifier par l'expérience :

- l'intensité du courant qui sort de la pile est

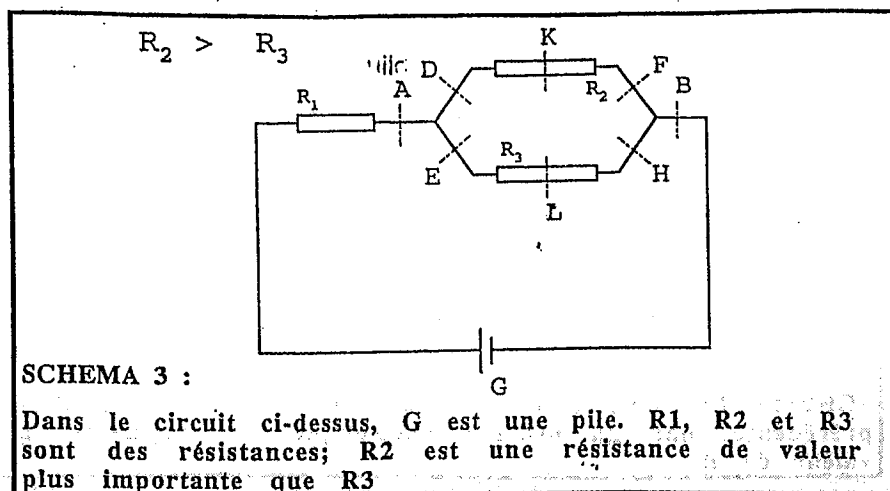
- l'effet d'un conducteur résistant sur la circulation : il ...

Expérience :

Conclusions que je tire :

Conclusions de la classe :

Question III



Q3/a,b,c,d Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en D
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en F
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Quelle hypothèse as-tu envie de vérifier par l'expérience :

- ce qui se passe à un noeud : je pense ...

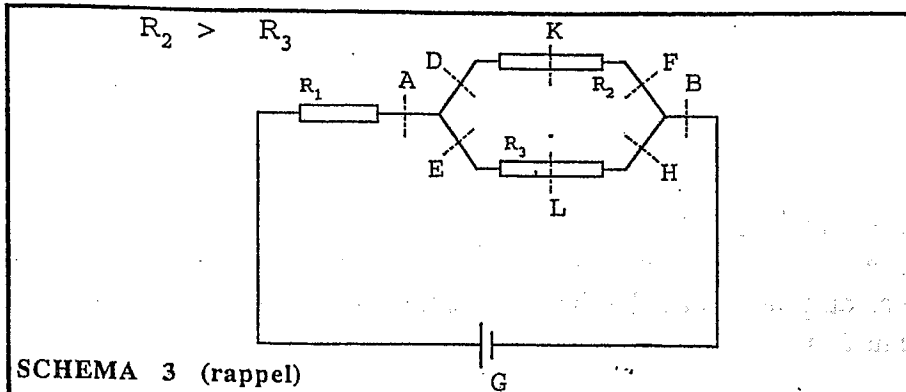
Expérience :

Conclusion que je tire :

Conclusion de la classe :

Question III

Attention : ceci est la suite de la question précédente : le schéma est un simple rappel



SCHEMA 3 (rappel)

Dans le circuit ci-dessus, G est une pile. R_1 , R_2 et R_3 sont des résistances; R_2 est une résistance de valeur plus importante que R_3 .

Suite de la question 3 (même circuit)

Q3/ <i>e, f, g</i> Cochez la réponse correcte		
L'intensité de courant en D est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E
L'intensité de courant en K est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en L
L'intensité de courant en F est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Quelle hypothèse as-tu envie de vérifier par l'expérience :

- comparaison de l'intensité dans des branches dérivées ayant des dipôles différents :
je pense ...

Expérience :

Conclusion que je tire :

Conclusion de la classe :

3° Etape : intensité d'un courant continu

Deux déroulements possibles, après le questionnaire suivant que ce sera un cours ou un T.P. :

si c'est un T.P. : traiter le I avec les expériences, puis le II en cours,

si c'est un cours : traiter le II en cours d'abord, et dans le III l'analogie, puis le I en T.P.

Introduction : approche d'une définition de l'intensité :

nous savons que dans un circuit, il ... circule un ... courant électrique. Il en circule plus ou moins selon ... la f.e.m. du générateur et les dipôles récepteurs présents ... Il est plus ou moins ... intense. Autant de points à préciser.

I / Expériences

Remarque : intentions à l'origine de ce questionnaire :

faire exprimer, avant enseignement, les représentations de la circulation dans le circuit, lues à la lumière des représentations connues :
- local - séquentiel - à courant constant - énergétique
et tenter de suivre leur évolution avec l'enseignement.

1 - Expériences 1 et 2

Démarche habituelle : discussion hypothèses présentes expériences et interprétation.

a - Hypothèses rencontrées que l'on cherche à valider par l'expérience :

- comment évolue l'intensité en différents points du circuit ? (Question I)
 - une plus grande résistance a-t-elle besoin de plus de courant, ou
 - retient beaucoup de courant (comme un barrage), ou
 - freine plus le courant ?
 - la pile débite toujours le même courant ?
- ou :
(Question II)

b - Expériences

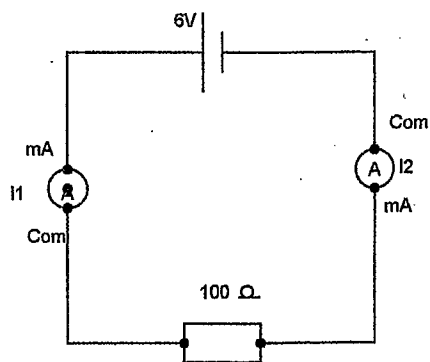
Rappel : - appareil de mesure : nom et symbole ... Où le placer dans le circuit ? Il se monte en ... série ...

- ses bornes, mA et Com, à quoi les relier ?

- les calibres : dans le doute prendre toujours le plus grand : aujourd'hui ce sera 400 mA.

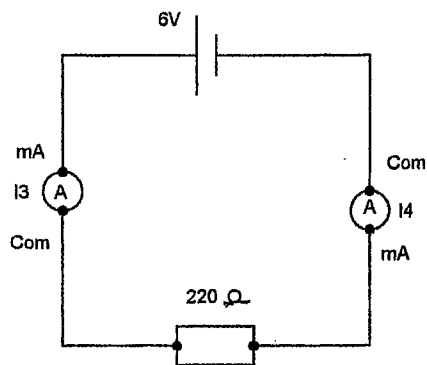
Recherche, au brouillon, du schéma des expériences qui permettent de trouver une réponse aux questions posées :

Schémas des expériences :



I₁ =

I₂ =



I₃ =

I₄ =

- Observations :

$I_3 < I_1$ quand la valeur de la résistance augmente l'intensité du courant électrique diminue. La résistance est un frein à la circulation : plus elle augmente, plus elle freine.

$I_1 = I_2$ et $I_3 = I_4$

l'intensité du courant qui sort du générateur est égale à l'intensité du courant qui rentre dans le générateur ...

l'intensité du courant qui sort de la résistance est égale à l'intensité du courant qui rentre dans la résistance.

Pourquoi ? rappel de la nature du courant ... peut-on empiler des charges de même signe ?

Il est impossible d'accumuler des charges électriques de même signe.

Les charges électriques sont conservées à l'intérieur du circuit électrique, ce qui veut dire que lorsqu'il est le siège de la circulation d'un courant électrique, toutes les charges qui arrivent à un dipôle en repartent.

c - Conclusion

En tout point d'un circuit, formé de dipôles montés en série, l'intensité est la même.

Elle est d'autant plus importante que la valeur de la résistance est faible (si elle est nulle, c'est un court-circuit, accompagné d'une intensité énorme, dangereuse) ou,

d'autant plus faible que la valeur de la résistance est importante, que le frein est puissant (une résistance de plus en plus forte se rapproche d'un isolant : le frein est si puissant qu'il n'y a plus de mouvement possible : le circuit se comporte comme s'il était ouvert et l'intensité tend vers zéro).

d - vérification avec une résistance variable

Expérience où la résistance variable est un rhéostat :

$$0 \leq R_{AC} \leq R_{AB}$$

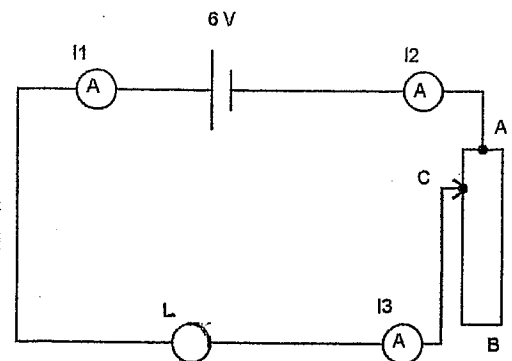
On observe son influence sur une ampoule et des ampèremètres. On attend :

leur faire émettre les hypothèses, par exemple :

$$I_1 = I_2 = I_3$$

R augmente

I diminue



On observe que lorsque :

R augmente : l'éclairement de l'ampoule diminue, et l'intensité diminue, ou,

R diminue : l'éclairement de l'ampoule augmente et l'intensité du courant aussi.

Conclusion : leur faire trouver

L'intensité du courant et l'éclairement de l'ampoule varient dans le même sens, et en sens contraire de la résistance :

plus la résistance est faible, moins elle freine, plus l'intensité est forte, plus l'ampoule éclaire.

2 - Circuit avec dérivations

Démarche habituelle : discussion hypothèses présentes expériences et interprétations

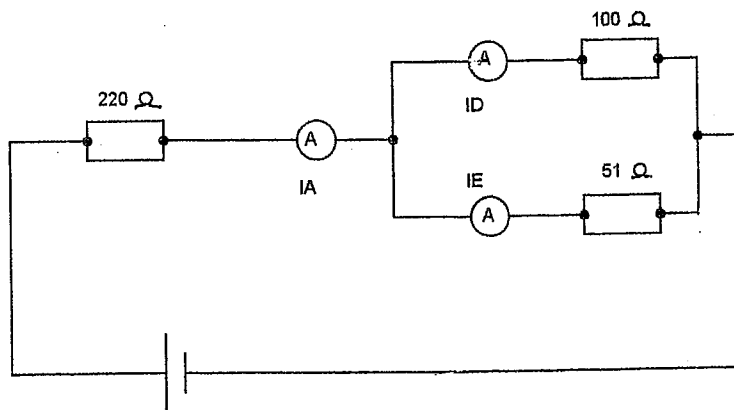
a - Hypothèses présentes

$I_A = I_D = I_E$ ou ? $I_A = I_D + I_E$ avec partage toujours égal, $I_D = I_E$ ou fonction des dipôles ?

Nous avons eu l'occasion de remarquer, que chaque fois qu'il est question de **partage**, pour une majorité d'élèves il est compris comme étant automatiquement sous entendu **en parts égales** ...

b - expérience :

Le montage est celui des questions III, seules les valeurs des résistances sont imposées de façon qu'elles aient un ordre de grandeur voisin, sans être égales afin que le rôle de chacune soit perceptible.



mesures :
 $I_A = 24 \text{ mA}$
 $I_D = 8 \text{ mA}$
 $I_E = 16 \text{ mA}$

observations :
 $I_A = I_D + I_E$
 et : $I_D \neq I_E$

Les mesures peuvent ensuite, si le besoin se fait sentir, être faites en plaçant les ampèremètres de l'autre côté des dipôles, avec prévisions préalables, pour confirmer la conclusion des expériences précédentes.

c - Conclusion

Le courant qui arrive à un noeud se répartit dans les branches selon les composants présents, par exemple, (suggérer des exemples, leur faire terminer les prévisions avec expérience à l'appui si besoin ...) si dans une branche : - l'interrupteur est ouvert ...

- c'est un simple fil ...

et si dans une branche la résistance R_1 est double de celle de l'autre R_2 , on peut prévoir

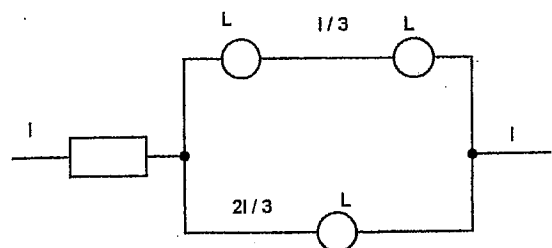
$$R_1 = 2 R_2$$

$$I_2 = I_3 / 2$$

Soient trois lampes identiques montées, l'une dans la branche E et les deux autres en série dans la branche D, on peut prévoir : faire trouver le schéma à partir de sa description, puis les prévisions :

$$I_D = I / 3$$

$$I_E = 2I / 3$$



Vérifications expérimentales si besoin.

II / Rappels et définitions (cours)

1 - Courant électrique

Du point de vue structure, qu'est-ce qui distingue un conducteur d'un isolant ? ...

Un corps conducteur possède des **porteurs de charge mobiles**, alors que ...
dans un isolant les particules chargées ne peuvent pas se déplacer.

Ce sont :

- les ions dans les électrolytes
- les électrons de conduction dans les métaux.

Un courant électrique est dû à un **mouvement d'ensemble** des porteurs de charge mobiles d'un corps conducteur.

Expériences possibles :

- faisceau d'électrons dans le vide
- fil électrique parcouru par un courant + aimant
- électrolyse dans un tube en U d'une solution sulfate de cuivre + dichromate de potassium

2 - Sens de déplacement des porteurs de charge

A l'extérieur du générateur les électrons, libérés par une réaction chimique à la borne - circulent vers la borne + où ils participent à une autre réaction :
ils circulent de la borne - vers la borne +.

Dans un électrolyte, les porteurs de charge sont les ions :

- les anions - se dirigent vers la borne + du générateur
- les cations + vers la borne -

visible avec l'électrolyse de la solution, mélange de sulfate de cuivre au cation bleu et de dichromate de potassium à l'anion orange.

3 - Sens conventionnel de circulation du courant

a - rappel

C'est la force électromotrice du générateur qui est à l'origine du mouvement dans le circuit, du haut vers le bas, du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus bas.

b - sens conventionnel

Remarque : on ne peut décider d'un phénomène par convention. Il y a deux façons équivalentes de décrire un phénomène : une rue qui monte est une rue qui descend : il faut donc choisir un sens.

Il a été choisi arbitrairement par André-Marie Ampère (1775-1836), à une époque où l'on ignorait la nature électronique du courant.

Le sens conventionnel du courant correspond au **sens du déplacement des porteurs de charge positive**

Dans un métal, le courant électrique est dû à un déplacement d'ensemble des électrons de conduction, dans le sens opposé au sens conventionnel du courant.

Dans un électrolyte, les cations se déplacent dans le sens conventionnel du courant, les anions dans le sens opposé.

Le courant descend les potentiels à l'extérieur du générateur ... (comme l'eau descend en altitude).

4 - Intensité

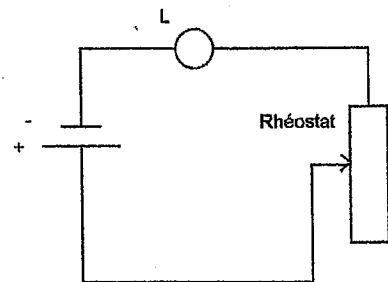
rappel : comme tout concept, il a été créé de toutes pièces par les physiciens pour expliquer, prévoir ... Il n'est donc pas d'accès immédiat, et à bien faire distinguer

- du "courant", vague notion fourre-tout, mais aussi
- de la d.d.p., dont les lois sont symétriques.

a - Mesure

expérience préliminaire qualitative :

générateur + rhéostat + ampoule



observation :

selon le réglage du rhéostat, l'ampoule éclaire plus ou moins,
on dit que le courant qui la traverse est plus ou moins ... intense

L'intensité est une grandeur qui caractérise le courant électrique, sa circulation, c'est à dire la quantité de courant qui circule, le nombre de porteurs de charge qui circulent ...

aussi se mesure-t-elle avec un ampèremètre qui se monte ... car il doit être ... traversé par le flux ... L'unité d'intensité est l'Ampère de symbole A.

Branchement : Com est relié au - et A au +

Attention aux calibres :

toujours commencer par le plus grand.

b - Définitions

Dans un conducteur métallique parcouru par un courant, le mouvement des électrons est un mouvement d'ensemble lent. Si le **courant est continu**, **chaque section** du conducteur, quelle que soit sa surface, **est traversée** en 1s par exemple, **par le même nombre d'électrons**. Or chaque électron de conduction transporte la charge électrique élémentaire $-e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

S'il circule n électrons dans l'intervalle de temps t , la charge électrique ou quantité d'électricité

$$q = -ne$$

traverse, en 1s chaque section du conducteur, en sens inverse du sens conventionnel.

La quantité d'électricité qui traverse les sections 1,2, ... en 1s est la même : elle se conserve, car il **ne peut y avoir accumulation de la charge électrique** ... quelque part :

Dans un circuit parcouru par un courant continu, toute section d'un conducteur est traversée pendant un temps déterminé par la même quantité de charges. (quantité d'électrons)

Considérons un conducteur métallique parcouru par un courant d'intensité I . A travers une section (S) du conducteur il passe, dans le sens du courant, pendant une durée t une quantité d'électricité Q telle que :

$$Q = I \cdot t$$

Q en Coulomb (C)

$$I = Q / t = ne / t$$

t en seconde (s)

Y. 64

L'intensité est le ... de charge, le nombre de charges, la quantité qui traverse une section par unité de temps. Exemples :

un câble en travers d'une route peut compter les voitures ou
donner le nombre qui circule à l'heure
une rivière en crue ... débite ... m^3/h ...

L'intensité correspond aussi à un débit,
au débit de charges à travers une section du conducteur constituant le circuit.

(ici, on peut poser la question : y-a-t-il un lien entre débit et vitesse ? ou :

Si le débit est le même, dans le fil et dans le filament de l'ampoule, tous les électrons vont-ils à la même vitesse ?

Car des entretiens ont fait apparaître qu'une explication possible du viol de la loi des noeuds avant enseignement venait du fait que "les électrons avaient tous la même vitesse, avant et après le noeud").

Conclusion : si le débit est le même partout, ce n'est pas le cas de la vitesse : c'est bien le débit et lui seul qui peut caractériser la circulation à l'intérieur d'un circuit, c'est donc lui qui a été choisi comme définition de l'intensité du courant.

Qu'est-ce qui peut avoir une influence sur l'intensité, le débit des porteurs de charge ?

- qui peut l'accélérer ? une plus grande hauteur de chute, ... un meilleur conducteur ...
- le ralentir ...

Nous allons préciser ses propriétés à l'aide des expériences ...

et tenter de les comprendre à l'aide d'une analogie ...

III / Lois de l'intensité (cours seul ou T.P. puis cours)

1 - Rappel des résultats expérimentaux

a - expérience 1

circuit simple où tout est fixé : cette question ne permet de déceler que les raisonnements local et séquentiel, celui à courant constant et celui du physicien correspondent à la même réponse.

Conclusion : leur demander de la formuler en utilisant le cours, par exemple :

le débit de charge est le même à l'entrée et à la sortie du générateur, comme de la résistance. Il n'y a accumulation de charge nulle part dans le circuit, ... d'ailleurs est-ce imaginable, ... d'empiler sans fin des charges de même signe ?

En tout point d'un circuit formé de dipôles monté en série, l'intensité est la même

Que se passe-t-il si R augmente, reste-t-elle la même ?

b - expérience 2

la similitude de questionnement avec la page précédente se limite au libellé de la question. Elle masque une énorme différence : R variant, c'est l'étude d'un circuit évolutif, étude inhabituelle dans l'enseignement actuel. C'est l'occasion :

- pour l'élève de préciser sa représentation du phénomène, et l'influence de la résistance sur le débit,
- pour nous de distinguer le raisonnement à courant constant de celui du physicien et d'observer la stabilité ou non du raisonnement de l'élève.

Conclusions : leur demander ...

- l'intensité mesurée dans l'expérience 2 est inférieure partout à celle mesurée dans l'expérience 1 : la résistance freine plus si sa valeur augmente : **R est un frein à la circulation.**
- ce qui caractérise un générateur, c'est sa force électromotrice, la d.d.p. à ses bornes, pas le débit d'électrons : pour un générateur donné, il dépend du circuit :

L'intensité dans un circuit dépend de tous les éléments de ce circuit ...

par exemple de : *leur faire dire ...*

- du générateur et de sa f.e.m.
- des conducteurs qui laissent plus ou moins bien circuler le flux d'électrons, le freins plus ou moins.

2 - Analogie de la chaîne de vélo

a - rappel

	Chaîne	circuit électrique
constitué de	maillons	électrons
en nombre	fixe	constant
	aucun n'apparaît, aucun ne disparaît	
il décrivent	une boucle	
ils assurent	la mise en relation	
	du pédalier avec la roue	de la pile avec l'ampoule
leur rôle est	un transfert d'énergie	
	du pédalier à la roue	de la pile à l' ampoule
grâce au	mouvement des	
	maillons	électrons
dû à une	force	
exercée au niveau du	pédalier	générateur (f.e.m.)
Ce mouvement peut se caractériser par	un débit,	
	<i>et pas une vitesse, si celle des maillons est la même, c'est faux pour les électrons</i>	
	<i>(on touche là à une limite de l'analogie)</i>	
qui peut s'exprimer en	maillons / s	électrons / s
Ce débit est	le même en tout point de la chaîne	
il dépend de la force	exercée sur le pédalier	électromotrice du générateur
et de	la pente, des frottements	du circuit et des récepteurs
il constitue	un système en interaction :	
	un état donné est un état d'équilibre entre tous les éléments du système	
	toute modification en un point crée un déséquilibre et aboutit à un nouvel état d'équilibre.	

Commentaires :

ils peuvent être présentés aux élèves, avec mission pour eux de traduire ce qui est dit au sujet de la chaîne de vélo, en propriété du circuit électrique

Cette analogie donne une idée de la **circulation de matière en circuit fermé** : la chaîne effectue une boucle : depuis le générateur il y a un départ et un retour de la chaîne ...
... *conservation de la charge*

Ce n'est pas la **présence** des maillons qui caractérise le transfert d'énergie, mais leur **déplacement**, ce qui aide à différencier l'aspect énergétique du fluide en mouvement de son aspect matériel ... *il y a toujours la présence d'un nombre constant d'électrons dans 1 cm^3 de fil, ils sont ou non en mouvement, ... , il y a ou non circulation d'un courant, ...*

On peut bloquer ou libérer la chaîne et ainsi **provoquer** ou **stopper** le **transfert d'énergie** à la demande :

- peu importe la **position** du dispositif bloquant la chaîne, son efficacité est indépendante de sa position ... *que ce soit l'interrupteur ouvert ou un fil coupé ...*

- quelle que soit la position du dispositif d'arrêt, la **force** qui s'exerce sur lui correspond à celle qui s'exerce sur la chaîne, à la sortie du générateur mécanique ... *la d.d.p. aux bornes de la coupure, et celle aux bornes du générateur, en circuit série, ...*

- dans le récepteur les effets, dès la libération du blocage, sont immédiats, d'où l'idée de la différence entre la **vitesse de circulation** et la **vitesse de transmission** de l'information : *les électrons se déplacent en effectuant qq cm à la minute, mais l'ordre de mise en marche est instantané ...*

- qu'une modification en un point du circuit va se traduire aussitôt sur l'ensemble ... début de construction de l'image d'un **système en interaction** ... *si on modifie le générateur ou ...*

Pour caractériser la cinétique du système on peut définir un débit de maillons : comme ces maillons sont incompressibles et qu'ils se conservent, **ce débit est le même** en n'importe quel point de la chaîne : ... *le débit, c.a.d. l'intensité en tout point d'un circuit série ... (cette image de l'unicité du courant en circuit série devrait aider à l'évolution du raisonnement séquentiel).*

b - Utilisation

b - 1 - pour l'interprétation du fonctionnement du circuit simple

A l'origine, se trouve le générateur, qui impose une d.d.p. qui provoque la circulation d'un courant électrique à travers les conducteurs du circuit. Ce courant dépend de la résistance, frein qui règle le débit : **ce débit est le même en tout point de la chaîne** conductrice, est la même en tout point d'un circuit série. Pour un générateur donné, il dépend du récepteur qui est plus ou moins bon conducteur et qui freine plus ou moins le débit : si on élève R , c'est à dire le frein, l'intensité ... au contraire, si R devient négligeable, I prend une valeur énorme, c'est le court-circuit et ses dangers ...

Conclusion : l'intensité est la même en tout point d'une branche d'un circuit électrique.

(attention, là je franchis un pas de généralisation qui a été rencontré, sans doute pas souligné, à la question III, on aura l'occasion de le revoir dans un circuit à plusieurs branches en réinvestissement)

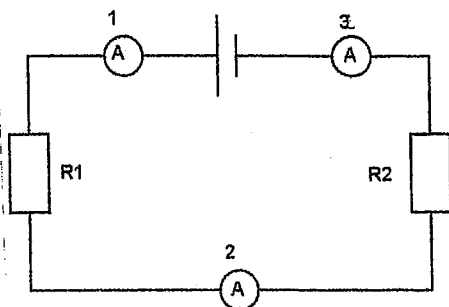
Utilisation : proposer un circuit très complexe avec de nombreuses branches, des dipôles variés ... et demander de comparer l'intensité :

- de part et d'autre de l'un des générateurs ...

après recherche, parfois laborieuse, puis accord sur la réponse ...

- de part et d'autre d'un récepteur ...

b - 2 - prévision du fonctionnement du circuit série



Rappel :

Avec l'image de la hauteur de chute, on sait déjà que la d.d.p. fournie par le générateur provoque la circulation d'un courant électrique dans le circuit.

Ce courant traversant un conducteur provoque une chute de tension entre ses bornes ; traversant des dipôles en série, la hauteur de chute ou d.d.p. est partagée entre les bornes des dipôles, si de plus ils sont identiques, la hauteur de chute est la même : 2 ampoules identiques en série éclairent pareil

$$U_{L1} = U_{L2} = U_G / 2 \quad \text{et éclairent peu.}$$

On peut faire une autre lecture de ce circuit, à l'aide de l'image de la chaîne de vélo :

- une ampoule est un frein à la circulation
- ajouter une deuxième ampoule en série, c'est ajouter un deuxième frein au premier : le débit va ... diminuer, elles reçoivent moins d'énergie par seconde ... elles éclairent moins ... et avec l'image de la chaîne, il semblerait que :

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots$$

Vérification expérimentale :

- avec 2 ampoules identiques, ... puis des résistances différentes
(mesurer les intensités et les d.d.p. qui sont à comparer aux prévisions)
- puis échanger leurs places : l'ordre a-t-il une influence ?
- avec trois dipôles différents ... dont une LED - dans le sens passant - à contre sens
- avec trois ampoules : elles n'éclairent pas : pourquoi ? sont-elles grillées ? que se passerait-il s'il y en avait une de grillée ? prévoir les intensités et les d.d.p. pour mémoire, puis faire l'expérience ...

Conclusion :

Dans un circuit série, l'intensité du courant qui traverse tous les dipôles est la même.

énoncé volontairement provoquant pour les élèves au raisonnement local : elle est la même là où se placent les appareils de mesure, parcequ'elle est la même partout, y compris dans les dipôles générateurs ou récepteurs ...

même le générateur ? quel est le débit à travers G ? à travers R₁ ? et R₂ ?

C'est la même en chaque point d'une branche.

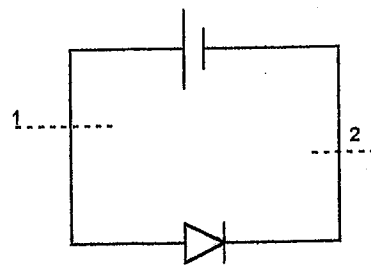
On peut alors donner une nouvelle définition de dipôles en série, basée sur des considérations électriques, pour aider les élèves souvent trop sensibles à des aspects géométriques trompeurs :

Des dipôles en série sont traversés par la même intensité, par le même flux d'électrons.

Application :

1 - Une LED supporte une intensité maximale de 30 mA
Alimentée par une alimentation stabilisée de 6 V, elle doit être protégée par une résistance dite de protection $R > 200 \Omega$

Où la placer ?



2 - Même question pour un fusible qui sert à protéger des surintensités ...

b - 3 - Circuit avec dérivations

La loi des noeuds est violée par un nombre non négligeable d'élèves :

- ayant l'idée que l'intensité représente la vitesse des électrons ... qui serait la même avant et après le noeud : aussi l'intensité serait la même de part et d'autre d'un noeud...
- ou qui font tourner le courant en boucle à l'intérieur des dérivations ;
- ou ... il existe peut-être d'autres représentations possibles qui restent à repérer ...

Rappels : à faire exprimer par les élèves en évoquant le questionnaire et le T.P.

Hypothèses : $I_A = I_D + I_E$ ou $I_A = I_D = I_E$ question III

et question III bis $I_D = I_E$ quels que soient les dipôles présents ou,
le partage au noeud dépend des dipôles dans les branches ?

remarque : l'expérience III peut servir de réinvestissement de la conservation de la charge, en leur demandant aussi de prévoir la relation existant entre :

I_A I_B et entre I_D I_F et entre I_E I_H

l'intensité étant constante dans une même branche d'un circuit, soit entre deux noeuds consécutifs.

L'expérience III bis est l'occasion de retrouver le rôle de la résistance, et d'ébranler une de leurs convictions, qui n'est vraie que lorsque les branches possèdent les mêmes dipôles : le **partage équitable à un noeud**.

Expériences :

III - les mesures donnent : $I_A = I_D + I_E$ et $I_B = I_F + I_H$
Des images de la vie courante aident à se le représenter :
- échangeur autoroutier
- confluent de deux rivières ... ou
- rivière au niveau d'une île ...

Ces résultats illustrent la conservation de la charge :

Conclusion 1 : la somme des intensités des courants qui arrivent à un noeud est égale à la somme des intensités des courants qui en partent. (**loi des noeuds**)

Remarque : on peut aussi dire que la somme algébrique des intensités est nulle, c'est à dire qu'à tout instant il ne peut y avoir accumulation de charges en un point, pas plus que de l'eau à un confluent ...

La loi des noeuds, comme toute loi concernant l'intensité, exprime la **conservation de la charge**, qui peut se résumer par : **ce qui arrive, repart.**

III bis - on constate que la loi énoncée pour le circuit simple s'applique à une branche :
- la résistance freine pareil dans toute la branche
- une résistance freine plus si sa valeur est supérieure
- on retrouve la loi des noeuds :

Conclusion 2 : le partage à un noeud se fait en fonction des dipôles présents dans les dérivations.

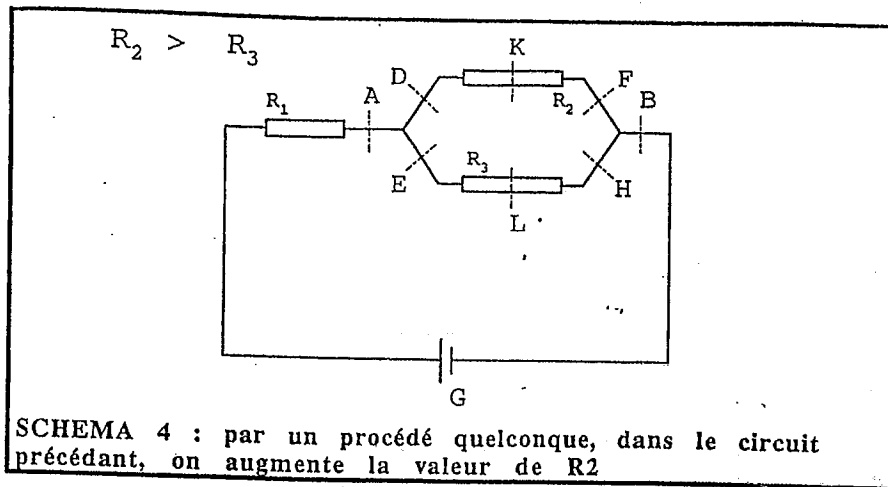
Exercices d'application : soit un noeud à n branches, connaissant tout ce qui se passe dans (n-1) branches, prévoir le sens et l'intensité du courant dans la dernière.

Distribuer, en cours, les **questionnaires réinvestissement**, p.68 à 72 ou 68-69 et 73 à 75, soient deux pages communes (suite du questionnaire de J.L.Closset), suivies d'un circuit mixte évolutif différent entre voisins.

REINVESTISSEMENT

Intensité

Question IV



Q4/a, b, c, d		Cochez la réponse correcte
L'intensité de courant en A est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en A auparavant
L'intensité de courant en D est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en D auparavant
L'intensité de courant en K est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en K auparavant
L'intensité de courant en F est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en F auparavant

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

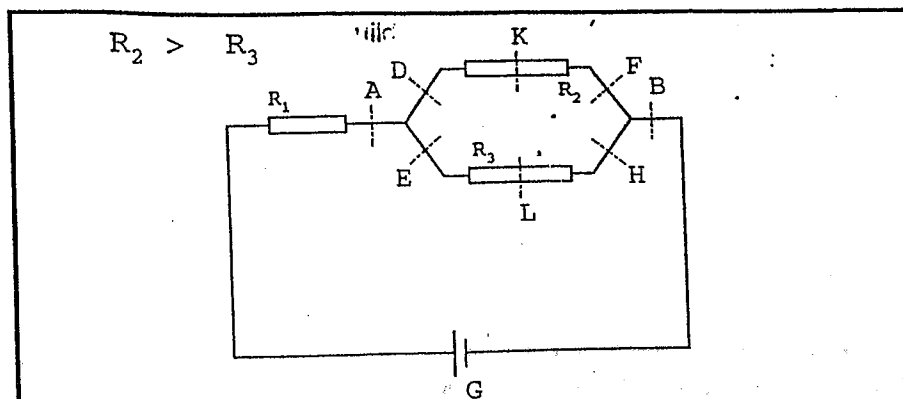
Expérience :

Conclusion que je tire :

Conclusion de la classe :

Attention : ceci est la suite de la question précédente : le schéma est un simple rappel

Question IV



SCHEMA 4 (rappel) : par un procédé quelconque, on a augmenté la valeur de R_2

Suite de la question 4 (même circuit)

Cochez la réponse correcte		
Q4/e, f, g, h		
L'intensité de courant en E est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en E auparavant
L'intensité de courant en L est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en L auparavant
L'intensité de courant en H est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en H auparavant
L'intensité de courant en B est :	<input type="radio"/> plus grande que <input type="radio"/> identique à <input type="radio"/> plus petite que	l'intensité de courant en B auparavant

Expliquer maintenant pourquoi le plus clairement possible :

Hypothèse à vérifier par l'expérience :

Expérience :

Conclusion que je tire :

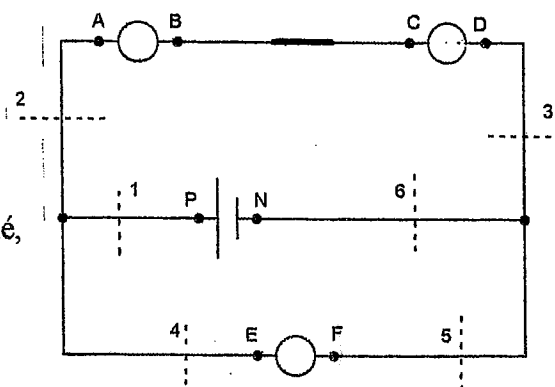
Conclusion de la classe :

Question V

Dans le circuit ci-contre, les trois ampoules sont identiques. On s'intéresse successivement :

- à la d.d.p. à leurs bornes
- à leur éclairage
- à l'intensité qui traverse les tronçons en pointillé, numérotés de 1 à 6.

Pour les comparaisons, utiliser le symbolisme :
 < plus petit que, ou > plus grand que, ou = égal à.



1 - Différence de potentiel, avec un circuit alimenté par un générateur de f.e.m. $U_{PN} = 6 \text{ V}$:

a - quelles d.d.p. peut-on prévoir aux bornes des dipôles :

$$U_{EF} = \quad U_{AD} = \quad U_{AB} = \quad U_{BC} = \quad U_{CD} =$$

b - Comparer l'éclairage des ampoules : (compléter avec > ou = ou <) :

$$AB \quad CD \quad ; \quad AB \quad EF \quad ; \quad CD \quad EF$$

2 - Intensité : comparer les intensités traversant les différents tronçons (notation : I_1 travers le tronçon 1). Chaque fois, expliquer votre prévision :

I_1 I_2 car :

I_2 I_3 car :

I_3 I_4 car :

I_4 I_5 car :

I_5 I_6 car :

Quelle(s) hypothèse(s) as-tu envie de vérifier par l'expérience :

Expérience(s), observations :

Conclusions que je tire :

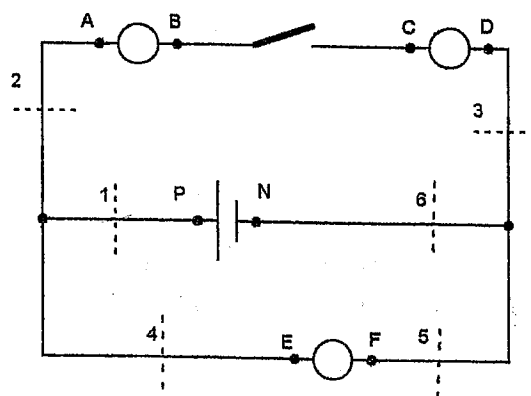
Conclusions de la classe :

Question VI

On reprend le circuit précédent,

- alimenté avec le même générateur,
- comprenant trois ampoules identiques,

mais on ouvre l'interrupteur :



1 - a - Que deviennent les **différences de potentiel** aux bornes des différents dipôles :

$$U_{EF} = \quad U_{AD} = \quad U_{AB} = \quad U_{BC} = \quad U_{CD} =$$

b - Comparer l'éclairement des ampoules à ce qu'il était à la question V,

(compléter avec plus, pareil ou moins) :

AB éclairera

CD éclairera ...

EF éclairera ...

2 - **Intensité** : les différents tronçons sont maintenant traversés par des intensités notées I' , (tel le tronçon 1 est parcouru par une intensité I'_1 ...). Les comparer à ce qu'elles étaient à la question V, et expliquer le plus clairement possible votre prévision :

I'_1 I_1 car :

I'_2 I_2 car :

I'_3 I_3 car :

I'_4 I_4 car :

I'_5 I_5 car :

I'_6 I_6 car :

Quelle(s) **hypothèse(s)** as-tu envie de vérifier :

Expérience(s), observations :

Conclusions que je tire :

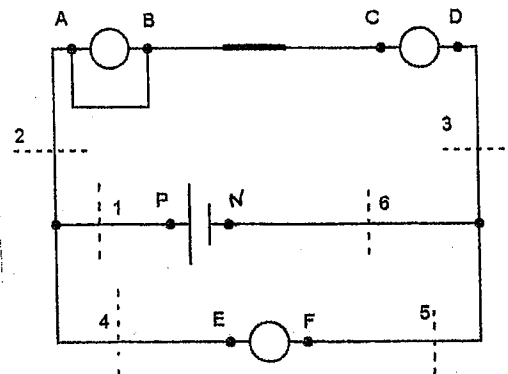
Conclusions de la classe :

Question VII

On repart du circuit de la question V, comprenant :

- le même générateur,
- les trois ampoules identiques,
- l'interrupteur est refermé, mais

on court-circuite l'ampoule AB avec un fil :



1 - a - Que deviennent les **différences de potentiel** aux bornes des différents dipôles :

$$U_{EF} = \quad U_{AD} = \quad U_{AB} = \quad U_{BC} = \quad U_{CD} =$$

b - Comparer l'éclairement des ampoules entre elles :

$$AB \quad CD \quad ; \quad AB \quad EF \quad ; \quad CD \quad EF$$

2 - **Intensité** : les intensités traversant les différents tronçons seront notées I'' .

a - Ecrire toutes les relations d'égalité qui existent entre elles : (utiliser tous les indices de 1 à 6)

$$I''_1 = I'' \dots \quad \text{car :}$$

$$I''_2 = I'' \dots \quad \text{car :}$$

b - Existe-t-il une relation simple entre les intensités traversant le générateur, I'_1 à la question VI et I''_1 à la question VII ?

car :

c - Comparer les intensités traversant le générateur utilisé aux questions V, VI, VII, soient I_1 , I'_1 et I''_1 :

car :

Quelle(s) **hypothèse(s)** as-tu envie de vérifier ?

Expériences, observations :

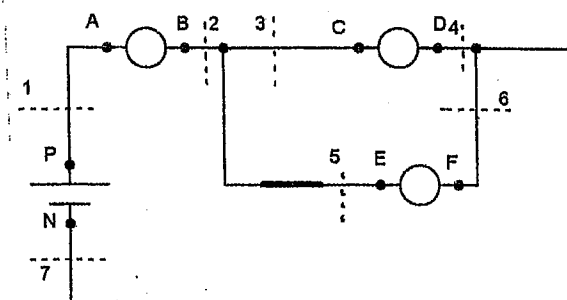
Conclusions que je tire :

Conclusions de la classe :

Question V

Dans le circuit ci-contre, les trois ampoules sont identiques. On s'intéresse successivement :

- à la d.d.p. à leurs bornes
- à leur éclairement
- à l'intensité qui traverse les tronçons en pointillé, numérotés de 1 à 7.



Pour les comparaisons, utiliser le symbolisme :

< plus petit que, ou > plus grand que, ou = égal à.

1 - Différence de potentiel, avec un circuit alimenté par un générateur de f.e.m. $U_{PN} = 12 \text{ V}$:

a - quelles relations pouvez-vous écrire entre les différentes d.d.p. aux bornes des dipôles : (si tu penses : qu'il n'en existe pas, le dire ... que tu connais la valeur, l'écrire ...)

U_{AB} U_{CD} U_{CD} U_{EF} U_{PN} U_{AD} U_{PN} U_{AF}

b - Comparer l'éclairement des ampoules : (compléter avec > ou = ou <) :

AB CD ; AB EF ; CD EF

2 - Intensité : comparer les intensités traversant les différents tronçons (notation : I_1 travers le tronçon 1). Chaque fois, expliquer votre prévision :

I_1 I_2 car :

I_2 I_3 car :

I_3 I_4 car :

I_4 I_5 car :

I_1 I_7 car :

Quelle(s) hypothèse(s) as-tu envie de vérifier par l'expérience :

Expérience(s), observations :

Conclusions que je tire :

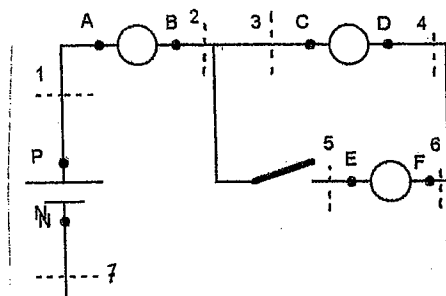
Conclusions de la classe :

Question VI

On reprend le circuit précédent,

- alimenté avec le même générateur,
- comprenant trois ampoules identiques,

mais on ouvre l'interrupteur :



- 1 - a - Que deviennent les **différences de potentiel** aux bornes des différents dipôles :

$$U_{AB} = \quad U_{CD} = \quad U_{BE} = \quad U_{EF} =$$

- b - Comparer l'éclairement des ampoules à ce qu'il était à la question V,

(compléter avec plus, pareil ou moins) :

AB éclairera

CD éclairera ...

EF éclairera ...

2 - **Intensité** : les différents tronçons sont maintenant traversés par des intensités notées I' , (tel le tronçon 1 est parcouru par une intensité I'_1 ...). Les comparer à ce qu'elles étaient à la question V, et expliquer le plus clairement possible votre prévision :

I'_1 I_1 car :

I'_2 I_2 car :

I'_3 I_3 car :

I'_4 I_4 car :

I'_5 I_5 car :

I'_6 I_6 car :

Quelle(s) **hypothèse(s)** as-tu envie de vérifier :

Expérience(s), observations :

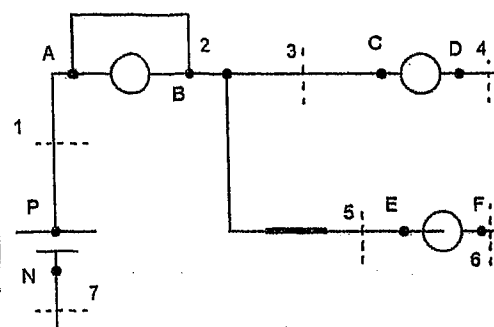
Conclusions que je tire :

Conclusions de la classe :

Question VII

On repart du circuit de la question V, comprenant :

- le même générateur,
- les trois ampoules identiques,
- l'interrupteur est refermé, mais on court-circuite l'ampoule AB avec un fil :



1 - a - Que deviennent les différences de potentiel aux bornes des différents dipôles :

$$U_{AB} =$$

$$U_{CD} =$$

$$U_{EF} =$$

b - Comparer l'éclairement des ampoules, à ce qu'il était avant le court-circuit (question V) :

AB éclairera

CD éclairera ...

EF éclairera ...

2 - Intensité : les intensités traversant les différents tronçons seront notées I'' .

a - Ecrire toutes les relations d'égalité qui existent entre elles : (utiliser tous les indices de 1 à 7)

$$I''_1 = I'' \dots$$

car :

$$I''_3 = I'' \dots$$

car :

$$I''_2 =$$

car :

b - Comparer les intensités traversant le générateur utilisé aux questions V, VI, VII, soient I_1 , I'_1 et I''_1 :

car :

Quelle(s) hypothèse(s) as-tu envie de vérifier ?

Expériences, observations :

Conclusions que je tire :

Conclusions de la classe :

III / Réinvestissement

A ce stade, les élèves ont peu à peu découvert le concept de d.d.p. avec sa définition, lui ont attribué des propriétés avec des montages en série ou avec des dérivations, même chose pour l'intensité. Nos objectifs de connaissance étaient, pour une part, voisins de ceux des documents "insights" utilisés pour "la main à la pâte" ... dont voici des extraits (p. 3/8) :

"une pile exerce une certaine poussée pour envoyer les électrons autour du circuit. Si le circuit est juste un morceau de cuivre, un courant relativement important passe et la pile s'use dans un temps très court. Si l'on met une ampoule dans le circuit, le filament de l'ampoule résistera au courant, mais pas comme un obstruant dans un conduit d'eau. Moins de courant passe, et ainsi la pile peut allumer l'ampoule et dure plus longtemps. Dans les deux cas, lorsque le courant passe, il génère de la chaleur

La chaleur provient des électrons du courant qui rebondissent contre les atomes stationnaires du métal quand ils s'éparpillent. Bien que le métal soit solide, la plupart de l'espace entre ces atomes est vide et les électrons peuvent se déplacer aisément. Mais parfois ils rebondissent sur un atome et le font trembler... la température d'un objet est reliée au nombre d'atomes qui s'agitent : plus il y en a et plus la température est haute... L'ampoule est utilisée comme indicateur de la quantité de courant passant dans le circuit, plus l'ampoule brille, plus il y a de courant qui passe.

... Une pile est dite d'un certain voltage : plus il y a de volts, plus elle pousse pour faire passer le courant. Le courant lui-même est mesuré en ampères. Pour un circuit donné, plus il y a de volts (poussée), plus il y a d'ampères (courant)."

Les deux questions IV du questionnaire de J.L. Closset nécessitent l'usage de la d.d.p. et de la résistance équivalente, aussi est-il posé là pour avoir une représentation initiale, et plus loin, pour voir si l'enseignement a permis une évolution, et laquelle. Il ne sera traité en classe que lors du réinvestissement final de l'ensemble des concepts, sur des circuits mixtes.

Les questions V à VII portent sur des circuits mixtes évolutifs. Il peut être fructueux de leur distribuer l'autre questionnaire : qu'ils cherchent à répondre chez eux au questionnaire qu'avait le voisin, même avec l'aide du cours, avant le travail en T.P., afin qu'ils y arrivent avec des hypothèses sur les deux circuits. L'ensemble demande une bonne maîtrise des concepts rencontrés.

T.P. réinvestissement

A gérer avec les étapes habituelles, page après page :

- 5 à 10 min. d'échanges ... par groupes de 4 ...
- mise en commun des prévisions, élaboration des hypothèses à écrire au tableau et sur les feuilles
- en déduire les expériences à faire pour les valider
- observations à noter
- interprétations à rechercher ... à l'aide du modèle construit en cours, ... ou à rappeler, ... peut-être à

enrichir, ... pour arriver à la conclusion de la classe, à leur faire formuler, avant de l'écrire au tableau et sur leurs feuilles.

C'est l'occasion :

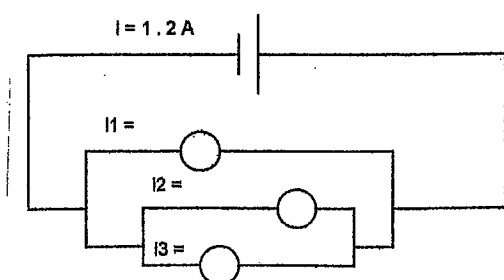
- de tous les essais expérimentaux, si possible après prévision, en évitant de court-circuiter le générateur...

si on dévisse AB ou CD ou EF que devient la d.d.p. aux bornes des dipôles., et l'intensité en différents points ? ...

si AB ou CD ou EF grille que deviennent

si ...

- de proposer de rechercher un schéma équivalent, à chaque transformation envisagée, pour mieux prévoir ... ou pour comprendre ..., avec un éventuel retour à la lecture des schémas, avec cet exemple de Shipstone :



Il induit une lecture séquentielle ...

Seule une analyse en termes de d.d.p.

... puis le tracé d'un schéma équivalent, plus conventionnel, permet aux élèves d'atteindre la réponse

- de préciser le comportement de **R, conducteur et résistant** :

ajouté en série, il **ajoute un frein** ... et l'intensité qui traverse le générateur diminue

ajouté en dérivation, il **propose un chemin supplémentaire** ... aussi l'intensité qui traverse le générateur augmente
et raisonnement symétrique : si on enlève ce dipôle : monté en série, IG augmentera
monté en dérivation, IG ...

- de préciser la différence de comportement d'une dérivation selon qu'elle se trouve ou non aux bornes du générateur :

- des circuits dérivés reliés directement au générateur se comportent comme des circuits indépendants, une modification à l'intérieur d'une branche affecte seulement cette branche et l'intensité qui traverse le générateur (exemples domestiques : un appareil supplémentaire mis en service ne perturbe nullement les autres, mais il arrive que "ça disjoncte" ...) sujet A, p. 70-72

- au contraire, dans un circuit où les dipôles sont montés en partie en série, en partie en dérivation, ils se trouvent tous en interaction : une modification à l'intérieur d'une branche se ressent en tout point du circuit.
sujet B, p. 73-75

- de redire que : - deux dipôles en série sont des diviseurs de la d.d.p.

qui sont parcourus par la même intensité, quelle que soit leur place respective.

- deux dipôles en dérivation sont des diviseurs de l'intensité

ils subissent la même chute de potentiel à leurs bornes.

- de mêler les deux concepts **U et I** aux interprétations, de mieux intégrer ces concepts par attribution de propriétés, d'en avoir besoin pour prévoir et donc de les trouver utiles aux prévisions, mais aussi à l'interprétation d'observations surprenantes.

Conclusions :

Conséquences de la conservation de la charge :

1 - L'intensité traversant les dipôles (générateur, fils récepteurs), montés en série est la même.

2 - L'intensité en tout point d'une branche (que ce soit la branche principale, ou une branche dérivée) est la même.

3 - A un noeud il y a partage de l'intensité, avec conservation de la charge, mais ce partage n'est pas toujours équitable : il est fonction des dipôles présents qui sont plus ou moins bons conducteurs. (exemple du court-circuit)

Il peut y avoir des rappels :

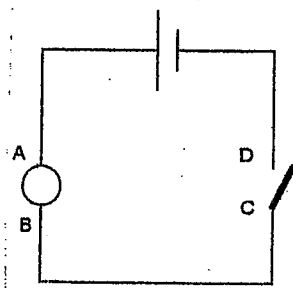
- **circuit, circulation** avec l'ouverture des circuits ... pour quelques élèves

- **d.d.p.** aux bornes de l'interrupteur ouvert, aux bornes de dérivation non directement reliées au générateur ...

Intensité et différence de potentiel :

1 - Ce sont des grandeurs liées : exemples : (à eux d'en trouver ...) mais bien différentes : exemples ...

2 - Histoires de zéros : soit le circuit, alimenté par une pile portant l'indication 4,5 V



remplir le tableau :

	K ouvert	K fermé
Intensité		
UAB		
UBC		
UCD		

Conclusions : **1 - intensité nulle ne signifie pas forcément d.d.p. nulle :**

- lorsqu'un courant circule dans un dipôle, il y a toujours une d.d.p. aux bornes de ce dipôle.
- lorsqu'une d.d.p. existe aux bornes d'un dipôle, il n'y a pas toujours un courant qui circule à travers ce dipôle.

2 - rappel : définitions de dipôles en série ou en dérivation :

(retour aux schémas de la p.20 si besoin)

Des dipôles en série sont traversés par la même intensité.

Des dipôles en dérivation ont la même d.d.p. à leurs bornes.

Ebauche de concept de conducteur résistant :

Nous avons pu observer l'influence de la place d'un dipôle sur ces montages évolutifs :

- l'effet de l'**ajout d'un dipôle** (ampoule ou "résistance" (*encore nommé conducteur ohmique ou résistor*))

- **en série**, c'est qualitativement ajouter un frein à la circulation,

diminuer la d.d.p. aux bornes des autres récepteurs,

(qui se partagent avec le nouveau celle fournie par le générateur)

c'est donc ... **diminuer l'intensité** en tout point du circuit.

- **en dérivation**, c'est proposer un chemin supplémentaire à la circulation des électrons,

il possède la même d.d.p. à ses bornes que les autres

(s'il est identique, il sera parcouru par la même intensité qu'eux)

c'est donc ... **élever l'intensité** qui traverse le générateur et la branche principale.

C'est pourquoi, à l'avenir, ces dipôles porteront le nom de "**conducteur résistant**" (*nom proposé par Shipstone*) pour souligner le double comportement de ce dipôle qui peut limiter le débit d'un circuit si on le place en série, ou au contraire l'élever si on le place en dérivation.

Demander aux élèves le raisonnement symétrique, qui leur est très difficile :

- l'effet de **retirer un dipôle**

en série, c'est enlever un ... à la circulation, donc l'intensité va ...

en dérivation, c'est supprimer un ... à la circulation, donc l'intensité va ...

C'est un conseil de D.Psillos de raisonner sur des circuits évolutifs, ce que l'enseignement usuel ne fait jamais, et je pense que c'est en comparant des situations proches que l'on comprend mieux la cause de leur différence et donc le rôle des composants.

Evaluation, puis

Correction de l'évaluation :

mêmes consignes que pour la d.d.p. feuille 49

TEST I / U

Consigne générale :

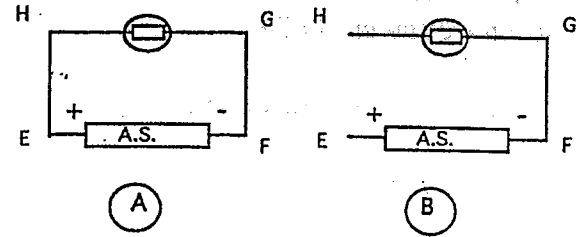
après avoir lu les différentes questions donnez votre réponse en plaçant une croix dans la case correspondant à la bonne affirmation

1 - Notion de tension et d'intensité

Considérez les deux figures A et B, où A.S. est une alimentation stabilisée :

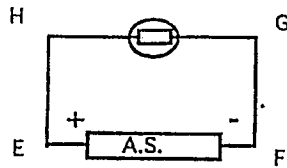
puis remplir le tableau ci-dessous :

	A	B
l'alimentation stabilisée délivre un courant		
il existe une tension entre E et F		
il existe une tension entre G et H		



2 - L'intensité du courant dans un circuit

2.1 - L'ampoule est branchée aux bornes de l'alimentation stabilisée

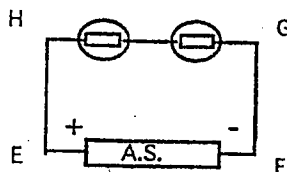


L'intensité est-elle la même de part et d'autre de l'ampoule ?

oui ☐ non ☐

Dans la négative, explique où elle est la plus faible et pourquoi :

2.2 - Une ampoule de même type est ajoutée en série dans le circuit



L'intensité dans la branche EH a-t-elle la même valeur que dans le circuit 2.1. ?

oui ☐ non ☐

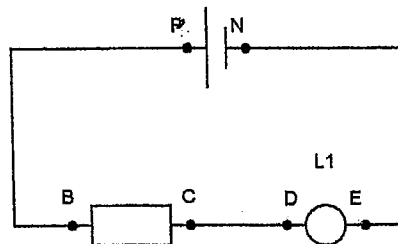
Dans la négative, explique si elle augmente ou diminue et pourquoi :

3 - Questions qualitatives :

On dispose :

- d'une alimentation stabilisée A.S. la d.d.p. à ses bornes est constante
- de deux lampes identiques L_1 et L_2
- d'un conducteur résistant BC

On réalise tout d'abord le montage :



Est-il possible de relier la lampe L_2 à deux points de ce circuit, ou de la placer dans ce circuit de façon à ce qu'elle brille :

a - plus fort que L_1 : oui / non / je ne sais pas

Justifier, et dans l'affirmative, faire le schéma du nouveau montage :

b - Aussi fort que L_1 : oui / non / je ne sais pas

Expliquer et si besoin tracer le schéma :

4 - Application

Soit le circuit où CD et EF sont deux ampoules identiques :

On effectue les mesures :

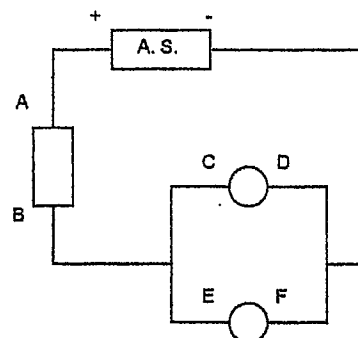
$$U_{CD} = 2V$$

$$U_{A.S.} = 6V$$

$$I_{CD} = 0,5A$$

Peux-tu prévoir, en les justifiant par des lois :

$$U_{AB} \quad \text{et} \quad U_{EF} \\ I_{EF} \quad , \quad I_{AB} \quad , \quad \text{et} \quad I_{AS} ?$$



à rédiger au dos de la feuille.

TEST I / U

Consigne générale :

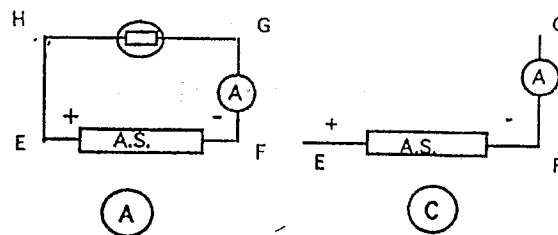
après avoir lu les différentes questions donnez votre réponse en plaçant une croix dans la case correspondant à la bonne affirmation.

1 - Notion de tension et d'intensité

Considérez les deux figures A et C, où A.S. est une alimentation stabilisée :

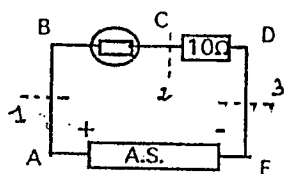
puis remplir le tableau ci-dessous :

	A	C
l'alimentation stabilisée délivre un courant		
il existe une tension entre E et F		
il existe une tension entre G et H		////////////////



2 - L'intensité du courant dans un circuit

2.1 - Un circuit comporte une ampoule et une résistance en série



L'intensité est-elle la même à travers les sections 1, 2 et 3 ?

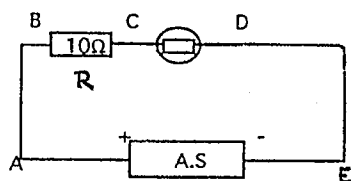
oui ☐

non ☐

Dans l'affirmative, dis pourquoi :

Dans la négative, explique son évolution le long du circuit, et pourquoi :

2.2 - On permute l'ampoule et la résistance :



Prévois-tu une variation de l'intensité avec la question 2.1 ?

oui ☐

non ☐

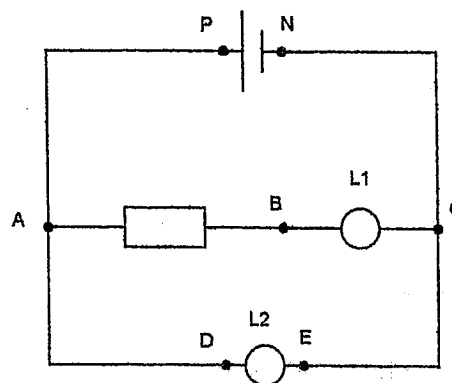
Dans l'affirmative, explique si elle augmente ou diminue et pourquoi :

3 - Questions qualitatives :

On dispose :

- d'une alimentation stabilisée A.S. la d.d.p. à ses bornes est constante
- de deux lampes identiques L_1 et L_2
- d'un conducteur résistant AB

On réalise tout d'abord le montage :



a - comparer l'éclairement des deux lampes :

L_1 brille plus fort / pareil / moins fort que L_2

Justifier :

b - Est-il possible de modifier le montage pour que les deux lampes aient le même éclairement ? : oui / non / je ne sais pas

Expliquer et si besoin tracer le schéma :

4 - Application

Soit le circuit où AB, CD et EF sont trois ampoules identiques :

a - On effectue la mesure :

$$U_{A.S.} = 6V$$

Peux-tu prévoir, en les justifiant par des lois :

U_{AB} , U_{CD} et U_{EF}

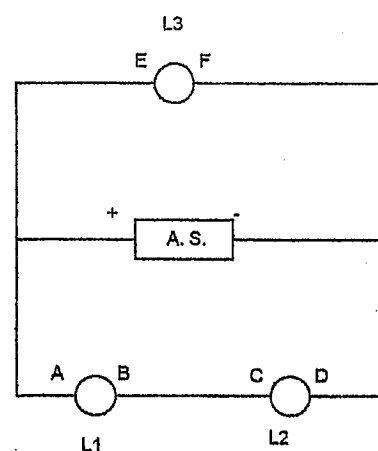
Conclure sur l'éclairement respectif des trois lampes.

b - On mesure $I_{CD} = 0,1 A$

Peux-tu prévoir, en les justifiant par des lois :

I_{EF} , I_{AB} , et I_{AS} ?

à rédiger au dos de la feuille.



T.P. préliminaire

à l'étude du

conducteur -résistant

Lors des études précédentes, une majorité d'élèves avaient évolué vers un raisonnement final à courant constant : sans doute faute d'avoir réussi à apprivoiser le concept de d.d.p., ils attribuent au générateur la propriété de délivrer toujours la même intensité quelque soit le circuit : elle fournit un courant constant au circuit.

Or un modèle acceptable à cette étape pourrait être formulé comme suit (D.Psillos):

"la résistance est la propriété des matériaux qui indique le degré de difficulté qu'ils présentent à la circulation du courant. La valeur du courant dans un circuit donné est déterminé par la tension et la résistance. Pour une tension donnée, une plus grande résistance entraîne un courant plus faible. Un résistor chauffe quand il est traversé par un courant. Quand un résistor chauffe beaucoup, il devient lumineux. Le filament d'une ampoule est un résistor."

C'est avec cette idée que j'ai lu et décidé d'exploiter l'article ci-joint de G. Robardet : " le jeu des résistors ". Ce T.P. préliminaire s'en inspire, et se trouve être un réinvestissement du chapitre précédent, sous la forme d'un jeu, dans lequel les élèves s'investissent bien volontiers.

1° partie : Jeu des résistors

20 à 30 min. maximum

But du jeu : Obtenir la plus forte valeur de l'intensité qui traverse le mA en utilisant de 1 à 5 résistances prises au choix, montées selon la fantaisie du joueur.

Matériel : il est constitué d'une plaque sur laquelle peuvent être branchées de toutes les façons possibles les résistances distribuées. Cette plaque est montée dans le circuit, en série avec une alimentation stabilisée en tension, un milliampèremètre et une lampe à incandescence.

(schéma p. 64 du document joint)

Déroulement : le tour dure moins d'une minute : le joueur place ses résistances, reste muet, ne prend pas de note, seulement si l'indication du mA est supérieure à ce qu'elle est pour le voisin, il marque un point. Au tour du voisin ...

Il est parfois utile de relancer le jeu, car ils commencent souvent par l'association série, finissent par trouver qu'une seule répond mieux que plusieurs, une petite mieux qu'une grosse, et quelques groupes en resteraient là, pensant avoir épuisé toutes les possibilités ... aussi peuvent-ils avoir besoin qu'on leur souffle qu'il existe bien d'autres façons de relier des résistances ...

Quand le temps total est écoulé il y a toujours un ou plusieurs groupes qui ont encore des idées à tester ...

2° partie : mise en commun des hypothèses

Le circuit est débranché, on recherche à deux la stratégie gagnante, chacun exposant ce qu'il croit avoir trouvé. (là ils sont très tentés de faire le montage pour montrer ou vérifier ...)

Les hypothèses présentes sont mises en commun au tableau,
puis discussion, avec la mise en commun de leurs observations,
et rappel de l'ébauche de modèle du chapitre précédent.

3° Observations et interprétation : (ordre de progression observé)

- plus la résistance augmente, plus le frein est ... fort, plus l'intensité diminue :
choisir une résistance faible ;
- plus il y en a en série, plus les freins sont ... nombreux, plus l'intensité diminue :

- placer une seule résistance et la plus faible ;
- et en dérivation ?... plus il y en a, plus il y a de chemins et l'intensité augmente :
en placer 5 en parallèle
 - ... et là ils en sont à se demander s'il faut plutôt les choisir petites ou grosses ?
 - et les montages mixtes ?

Remarque : en fait, l'an passé les élèves ont très bien joué, mais leurs représentations ont fort peu évolué ... deux hypothèses se présentent :
ou bien il s'agit d'un réel obstacle très difficile à franchir ...
ou, en relisant le déroulement, je constate que le texte parle de l'intensité qui traverse le mA, pas le générateur ... Il serait sans doute bon, en guise de conclusion de poser la question :

Dans les circuits construits :

- quelle intensité mesurait l'ampèremètre ?
celle qui traversait ... et ... et ... le générateur
- qu'est-ce qui est resté invariable au niveau du générateur ?
- qu'est-ce qui change dès que le circuit qu'il alimente est modifié ?

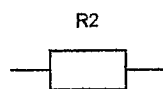
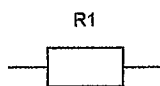
Conclusion : Ajouter une résistance en parallèle, c'est proposer un chemin supplémentaire aux électrons : l'intensité qui traverse le générateur augmente

Ajouter une résistance en série, c'est placer un frein supplémentaire sur le trajet des électrons : l'intensité qui traverse le générateur ...

Retirer une résistance d'un montage en série ... d'un montage en dérivation ... modifie l'intensité qui traverse le générateur. Elle dépend du circuit, toute modification du circuit entraîne un changement.

4° Mesures de résistances à l'ohmmètre :

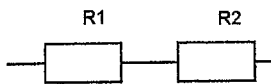
On a envie de vérifier notre approche qualitative avec des mesures : soient deux résistances choisies au hasard, mais d'un même ordre de grandeur, soient R_1 et R_2 :



L'ohmmètre indique :

$$R_1 = \quad R_2 =$$

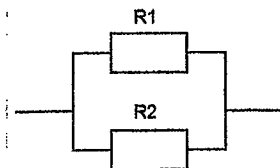
Soit leur association en série :



$$R_{12} = \quad = R_1 + R_2$$

spontanément trouvé par les élèves
elles se comportent comme une seule de
résistance dite "équivalente" R_{12}

Soit leur association en parallèle :



$$R_{1/2} =$$

là, ils cherchent en vain toutes les combinaisons pour trouver
une relation simple entre les deux valeurs de départ ... voir

cours. Tout ce que l'on peut dire à ce stade, conformément à l'expérience, c'est que : la résistance équivalente à l'association de deux résistances

- en série est plus grande que la plus grande
- en dérivation, est plus petite que la plus petite

remarque précieuse lors des erreurs d'utilisation des formules ...

5° Stratégie gagnante

- schéma à tracer au brouillon puis
- mise en commun au tableau et
- vérification expérimentale :

sans modifier la partie du montage fournie au début ils peuvent en profiter pour effectuer tous les tests dont ils ont envie ... vérifier tout ce dont ils ne sont pas certains ... et noter leurs observations ...

- il n'est pas rare, en circulant d'observer des élèves qui sont encore étonnés d'observer la lampe éteinte alors qu'il circule un courant ... c'est aussi pourquoi j'aime bien le modèle décrit par D. Psillos en introduction à ce T.P.

Ce T.P. joue le rôle de questionnaire préliminaire au cours, occasion pour l'élève de tester ses représentations, sans que le professeur y ait directement accès, mais il a eu déjà l'occasion de les rencontrer, grâce à une activité sous forme de jeu, nouvelle et plus motivante.

Le but du cours, à travers la découverte du conducteur résistant, sera la mise en relation des trois concepts U , I , R , de montrer leur interdépendance, déjà présente dans l'analogie de la chaîne de vélo.

Les résistors ou

Conducteurs résistants

Rappels :

- un **trait** signifie 2 choses :
 - le courant peut passer
 - les points ainsi reliés sont au même potentiel ... ils sont identiques du point de vue électrique.
- un **noeud** définit un potentiel : tous les dipôles reliés à ce noeud
- l'**intensité** du courant mesure le flux, le débit de courant, d'électrons
- la **d.d.p.** représente la prédisposition d'une pile à établir un courant.

Les dipôles	ont en	se partagent
	commun	
en série	I	U : relation de Chasles
		diviseurs de tension
en dérivation	U	I : loi des noeuds

- et l'**énergie** ? Elle est fournie par le générateur en fonction du circuit aux dipôles Il existe une interaction (interaction organisée par la "chaîne conductrice") entre le générateur et les dipôles à leur faire exprimer avec leurs mots ...

Un **générateur** possède une f.e.m. mais l'intensité du courant dépend du circuit. Un générateur est caractérisé par sa **f.e.m.** (penser lors de l'achat d'une pile ...) mais il n'est pas le régulateur du flux.

Ce sont les **récepteurs** qui sont des **régulateurs de flux**. Exemple : soit une ampoule portant les indications 100 W 220V est toujours traversée par la même intensité en usage normal :

$$P = U \cdot I \quad \text{donc} \quad I = P : U \quad I = 100 : 220 = A$$

Aujourd'hui, nous nous intéressons aux conducteurs résistants que sont les résistors, occasion d'établir des liens entre les concepts précédents

I / Expériences

A - Qualitatives

1 - Dans un même circuit où U_{PN} est constante :

- plaçons successivement des résistors différents portant des indications croissantes
- on constate que ... l'intensité diminue
- pourquoi ? - consommation de courant ?
 - rappel : un Ampèremètre placé avant ... après ...
- freine le passage des électrons

Un résistor a la fonction de contrôler le débit. Il est caractérisé par sa résistance R qui est la grandeur physique qui indique la difficulté (ou la facilité ?) de passage du courant.

Un résistor participe à la valeur de l'intensité, au même titre que le générateur, dans un circuit donné.

2 - Ils sont le lieu de la **transformation d'énergie**,

qui chauffent quand le courant les traverse : on parle de "résistances chauffantes". Dans quels appareils domestiques y-en-a-t-il ?

Ces dipôles possèdent deux fonctions :
- régulateurs de courant
- transformateurs d'énergie

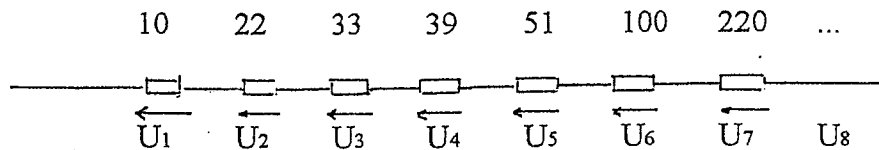
3 - Lien entre les résistors et les ampoules

L'ampoule que vous vivez dans la vie courante comme - consommateur d'énergie
nous avons eu l'occasion de la considérer dans un circuit série comme - régulateur de courant
Il y a une similitude entre les deux fonctions électriques des résistors et des ampoules :
- régulateur de ... et - transformateur de ...

Observer le filament d'une ampoule : - son diamètre et - sa longueur

$R = \rho \frac{l}{S}$ application : le rhéostat, résistance variable, proportionnelle à la longueur.

4 - Lien entre tension et résistance : représente les conditions pour la circulation du courant



Observation : lorsque R augmente, la d.d.p. aux bornes du dipôle augmente. Qu'est-ce qui est constant ? ... I .

Conclusion de cette approche qualitative :

La résistance est la propriété des matériaux qui indique le degré de difficulté ou de facilité qu'ils présentent à la circulation du courant.

La valeur de l'intensité du courant dans un circuit donné est déterminée par les valeurs de U et de R . Pour une tension donnée une plus grande résistance entraîne un courant plus faible.

Un résistor chauffe quand il est traversé par un courant. Quand un résistor chauffe beaucoup il devient lumineux : le filament d'une ampoule est un résistor.

B - Quantitatives

1 - U **PN constante**, placer successivement différents résistors et noter pour chacun :

$R =$ $I =$ $RI =$

Conclusion :

2 - Dans un circuit série aux composants fixés, tel le I / A - 4 , I est constante, noter :

R =

U =

U / R =

Conclusion :

rappel : des résistances en série sont des diviseurs de tension.

application : le montage potentiométrique ...

3 - Pour une résistance donnée, faire varier U à l'aide du montage ci-dessus, noter :

I =

U =

U / I =

Conclusion :

Résumé :

LOI d' OHM pour le résistor :

La tension U_{AB} aux bornes d'un résistor, ou conducteur ohmique AB, de résistance R_{AB} , traversé par un courant d'intensité I_{AB} allant de A vers B est donnée par la relation :

$$U_{AB} = R_{AB} \cdot I_{AB}$$

II / Associations de conducteurs ohmiques

rappel : ils ont deux aspects :

- ils sont conducteurs, sinon le circuit serait ouvert ...
- ils freinent le passage du courant dans la branche.

Ce sont des **conducteurs résistants** : selon le montage, l'un ou l'autre aspect sera plus visible.

1 - Association en série

a - **Expérience**, occasion de test d'hypothèse ...

Mesurer à l'ohmmètre : $R_1 =$ et $R_2 =$

Prévoir l'indication de l'ohmmètre de l'association série des deux résistors précédents :

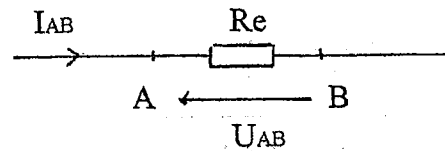
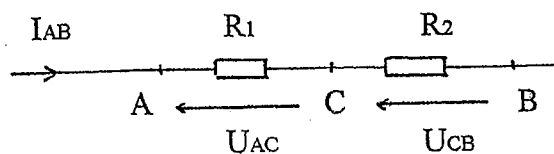
$R_e =$

Effectuer la mesure : $R_e =$

Interprétation : 2 freins en série, leurs effets s'additionnent

Définition : - de la résistance équivalente R_e ...
 - d'un schéma équivalent, utilisant la R_e ...

Une résistance équivalente a le même effet sur le circuit : elle possède la même d.d.p. à ses bornes et elle est traversée par la même intensité.



b - Démonstration :

$$U_{AB} = R_e I_{AB}$$

Schéma 2

schéma 1

$$U_{AB} = U_{AC} + U_{CB}$$

$$U_{AB} = R_1 I_{AB} + R_2 I_{AB} = I_{AB} (R_1 + R_2)$$

Identifions les 2 relations de définition de U_{AB} . Il vient : $R_e = R_1 + R_2$

L'association en série de conducteurs ohmiques de résistances $R_1, R_2, R_3 \dots$ est équivalente à un conducteur ohmique de résistance R telle que : $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

2 - Association en parallèle

a - Expérience :

Mesurer à l'ohmmètre $R_1 =$

Prévoir l'indication de l'ohmmètre, si on place deux puis trois résistances identiques en dérivation :

$$R_1 // R_1 \quad R'_1 =$$

$$R_1 // R_1 // R_1 \quad R''_1 =$$

Effectuer les 2 mesures : $R'_1 =$

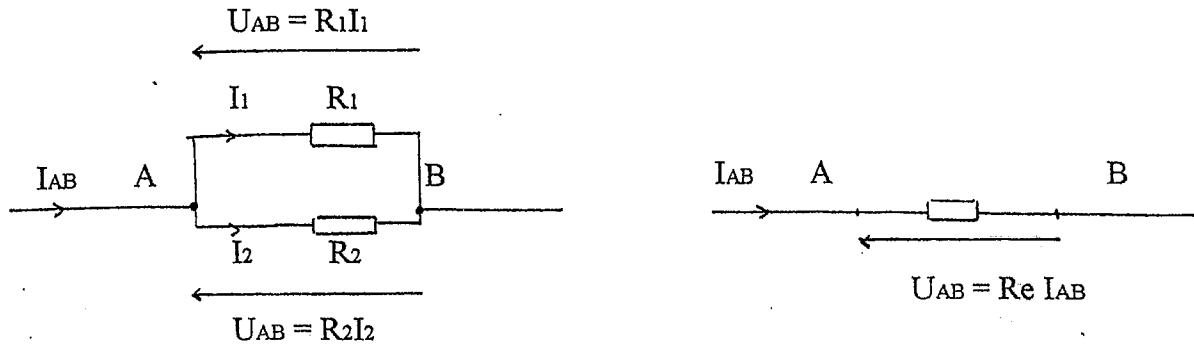
$$R''_1 =$$

Interprétation : plus le nombre de résistances en dérivation augmente, plus la résistance équivalente diminue. On augmente le nombre de branches, donc le nombre de conducteurs, le nombre de chemins possibles pour les électrons : l'intensité qui traverse le générateur augmente.

Ils conduisent d'autant mieux qu'il y en a plus !

La loi mathématique est difficile à découvrir expérimentalement : mieux vaut la démontrer puis en faire une vérification expérimentale.

b - Démonstration



$$U_{AB} = R_e I_{AB} = R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3 = \dots \quad \text{avec : } I_{AB} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

$$I_{AB} = U_{AB} / R_e$$

$$I_{AB} = U_{AB} / R_1 + U_{AB} / R_2 + U_{AB} / R_3 + \dots$$

Identifions :

$$1 / R_e = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / R_3 + \dots$$

L'association en dérivation de conducteurs ohmiques de résistances $R_1, R_2, R_3 \dots$ est équivalente à un conducteur ohmique de

- résistance R_e telle que :

$$1 / R_e = 1 / R_1 + 1 / R_2 + 1 / \dots$$

- conductance $G = 1 / R$ telle que :

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

3 - Réinvestissement

Evolution de l'un de ces montages en montage mixte

a - ajouter un dipôle en dérivation de deux en série

Quelle évolution de R peut-on prévoir ... et donc de l'intensité qui traverse le générateur ... car

b - Ajouter un dipôle en série de la dérivation

Quelle évolution de R peut-on prévoir ... et donc de l'intensité traversant le générateur ... car ...

c - Exercices :

c1 : Calculs de R_e d'associations complexes

c2 : Connaissant U_{PN} et les résistors d'un circuit, prévoir :

toutes les intensités qui les traversent, ainsi que les d.d.p. aux bornes des différents dipôles.

Le Circuit Electrique

I / Les générateurs de tension continue

1 - Définition

Un générateur est un *réservoir d'énergie* pour le circuit électrique

Il *possède une f.e.m. E* entre ses bornes : c'est la d.d.p. positive constante qui existe entre ses bornes lorsqu'il ne débite aucun courant. Elle s'exprime en volt.

Par ailleurs *tout conducteur possède une résistance* ... la pile est un conducteur ... elle possèderait donc une résistance, c'est ce que nous allons voir :

2 - Exemples de sources de tension continue

- la pile
- les transformateurs, dits alimentation stabilisée A.S.

a - Caractéristique d'une pile

Réalisons un circuit dans lequel I varie : exemple ?

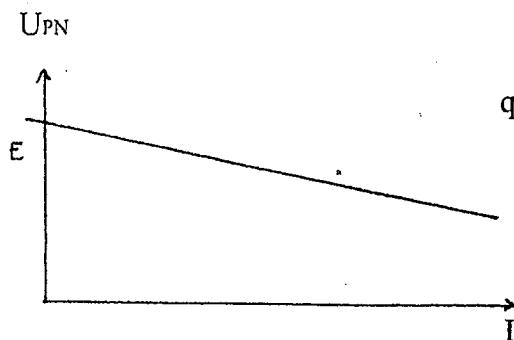
- pile à vide
- puis une ampoule à ses bornes
- puis une 2° en dérivation, puis une 3° , une 4° ...

Observons :

Tandis que l'intensité qui traverse l'A.S. s'élève, la d.d.p. à ses bornes diminue :

$I \nearrow$ $U_{PN} \searrow$

Notons les différentes valeurs prises par I et celles correspondantes de la d.d.p. et traçons $U_{PN} = f(I)$



Nous obtenons une droite inclinée de pente < 0 qui coupe les axes en :

$$I = 0 \quad U_{PN} = E$$

$$U = 0 \quad I = I_{cc}$$

Ohm en a donné l'équation :

$$U_{PN} = E - rI$$

où r est la résistance interne du générateur. Comment saviez-vous qu'il possède une résistance interne ?

une pile en service ... s'échauffe / une partie de son énergie est transformée en chaleur, c'est de l'énergie perdue ...

Regardons bien cette relation :

conformément à notre expérience, lorsque I s'élève, U_{PN} diminue, ce qui traduit l'influence du circuit sur la pile. Aux limites :

$U_{PN} = 0$ en court-circuit

et $U_{PN} = E$ en circuit ouvert

$$0 \leq U_{PN} \leq E$$

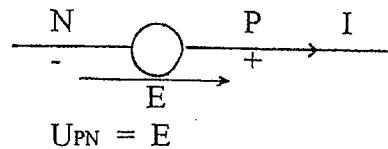
" quoiqu'il se passe dans le circuit, la pile le sait "

b - L'alimentation stabilisée ou source idéale de tension

Répetons l'expérience précédente avec notre transformateur 220 V / 6V . Nous observons que la d.d.p. reste constante quelque soit le circuit, quelque soit l'intensité qui le traverse ...

$$U_{PN} = E$$

- schéma conventionnel :



- définition : un générateur idéal est un générateur dont la d.d.p. à ses bornes reste constante et égale à sa f.e.m. quelque soit l'intensité du courant qu'il débite.

c - Le générateur réel : exemple de la pile

Il est l'équivalent de l'association en série :

- d'un générateur idéal de f.e.m. E égale à la f.e.m. du générateur réel et
- d'un conducteur ohmique de résistance r , résistance interne du générateur réel.

Schéma :

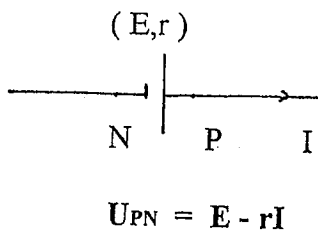
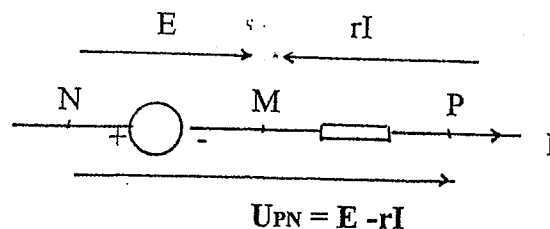


Schéma équivalent :



Loi d'Ohm pour un générateur réel

II / Le circuit

1 - L'analogie de la chaîne de vélo

rappel : cette analogie mécanique, où il existe une interaction entre le pédalier et la roue, nous a permis entr'autre de prévoir une **interaction entre les éléments d'un circuit** :

- tout changement au niveau du générateur entraîne ...
- toute modification au niveau des récepteurs :
 - nature : R, LED, Interrupteur ouvert ou fermé ...
 - caractéristique ...
- toute modification au niveau du circuit : cablages ...

C'est une chaîne fermée de conducteurs dont l'interaction aboutit à un état d'équilibre, lequel est remis en question par toute modification, si minime soit-elle ...

2 - Exemple

Soit le circuit constitué d'une pile et d'une association de conducteurs ohmiques de résistance équivalente R_e :

- c'est la même intensité I qui les traverse
- c'est la même d.d.p. aux bornes du générateur et aux bornes de R_e :

Les lois d'ohm permettent d'écrire :

- pour le générateur : $U_{PN} = E - rI$

- pour les récepteurs : $U_{PN} = R_e I$

L'intensité dans un circuit ne contenant que des conducteurs ohmiques alimentés par un générateur réel :

$$E - rI = R_e I$$

donc $E = I (R_e + r)$

ou $I = E / (R_e + r)$

Cette relation connue sous le nom de **loi de Pouillet**, est surtout à savoir retrouver

lecture : I est fonction de tout le circuit :

- du générateur (E, r) et
- des récepteurs et de leur association R_e

utilisation : si R_e passe de quelques ohms à des kilohms :

- I est divisé par ...
- U_{PN} ... ce qui montre **l'influence du circuit sur la pile** ...

de même si on associe 3 piles en série :

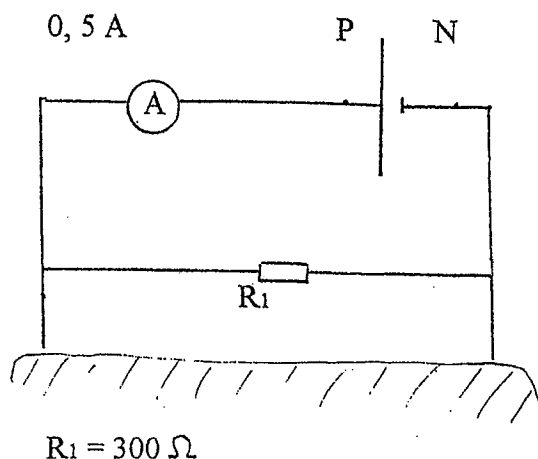
- la f.e.m. est multipliée par 3, r aussi et si $R_e \gg r$
- l'intensité qui les traverse est multipliée par 3 aussi ...ce qui montre

l'influence du générateur sur le circuit :

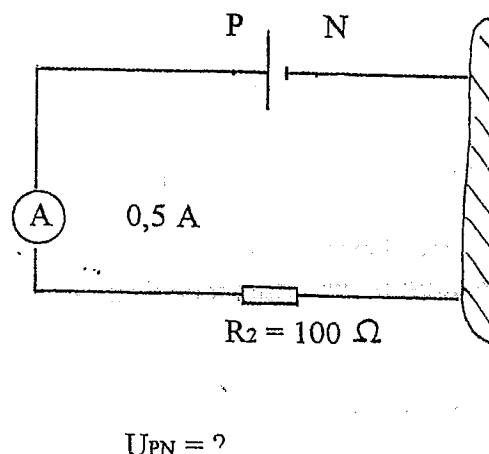
Conclusion : c'est ce qu'on entend par **système** qui organise une **interaction** ...

3 - Application : prévision sur des circuits partiellement cachés

Soit le circuit :



ou le circuit :



Calculer U aux bornes de R_1 : ...

certains sont fiers d'avoir trouvé très vite la réponse alors que ...

d'autres sont conscients de l'impossibilité de fournir une réponse, au grand étonnement des premiers ... et le plus malin n'est pas celui qui croit ...

Expliciter ce qui peut se trouver sous le carton

- pile ... en parallèle ou en opposition ...
- interrupteur ... ouvert ou fermé ...
- diode ... en sens passant ou en sens contraire ...
- R ...

Conclusion : en l'absence des données du circuit dans son intégralité, il est impossible de prévoir son fonctionnement.

Cette expérience intellectuelle est généralement très marquante ...

Ce chapitre peut être suivi :

- (ou précédé avec toute la documentation dont ils disposent dans ce cas là) d'un T.P. autonome type **T.P. Pop**, avec un poste expérimental par groupe de 4 élèves (ou 3 selon l'effectif du groupe), par exemple celui proposé p. 95 :

Générateur idéal ou pas ?

- d'un travail qualitatif sur les circuits mixtes, avec un retour aux prévisions de la question IV du questionnaire de J.L. Closset où un détour par la d.d.p. est nécessaire pour répondre aux questions en termes d'intensité ... p. 68 - 69.

- d'exercices faisant intervenir la résistance équivalente et les lois rencontrées sur les différents concepts, exercices qui se trouvent dans les manuels ...

La séquence est finie, son objectif d'une compréhension minimale du fonctionnement du circuit devrait permettre à l'élève de gérer les exercices traditionnels sur le fonctionnement d'un circuit (connaissant les dipôles récepteurs d'un circuit, si complexe soit-il et le générateur, trouver toutes les d.d.p. et toutes les intensités), mais aussi de donner des prévisions ou des explications plus qualitatives.

Le test final est laissé à l'appréciation de l'enseignant, en fonction des exigences du programme, mais aussi du niveau de la classe ... un test devant toujours être valorisant pour ceux qui ont travaillé ...

Le chercheur, lui, aime aussi à comparer le comportement des élèves avec lesquels il a travaillé et celui des autres, à plus ou moins long terme :

- cette année, j'ai passé un questionnaire commun à 8 classes (4 ayant vécu la séquence et 4 autres) en Mai, en partie qualitatif de compréhension des concepts, mais aussi quantitatif.

- je vais le faire repasser en Septembre à tous les élèves de 1^oS du lycée qui devront indiquer la classe fréquentée l'an passé (classe de 2^o), pour distinguer les deux formations, et observer sur un plus long terme.

Vous le trouverez ci-joint, p. 97 et suivantes, (comme toujours, 2 versions proches et différentes pour répartir entre voisins). Ce serait bien, si vous pouviez aussi le faire passer vers la même époque, aux élèves de votre classe expérimentale et peut-être à ceux d'une autre classe prise comme témoin ?

GENERATEUR IDEAL ?

OU PAS ?

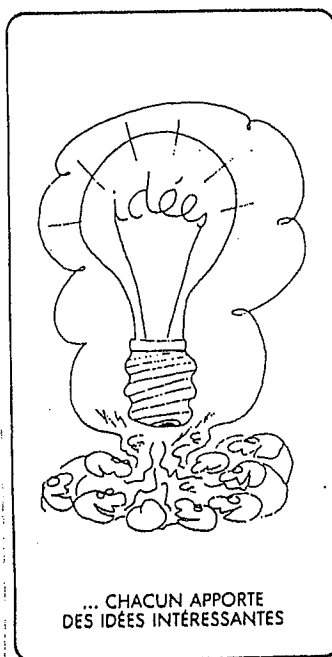
Déterminer, en traçant des graphiques expérimentaux, si
la **pile**
et le **générateur** dont vous disposez sont des générateurs de tension idéaux.

Dans le cas où le générateur n'est pas idéal, montrer à partir du graphique que :

$$U = E - rI$$

Donner les valeurs de E et r.

*Un générateur qui maintient entre ses bornes une tension fixe
quelle que soit l'intensité du courant débité,
est un générateur idéal de tension.*



On attend un **compte rendu** comportant :

- la méthode utilisée et la raison du choix du matériel
- les schémas de montage, tableaux de mesures et graphiques,
- et vos conclusions justifiées.

LE JEU DES RÉSISTORS : UNE SITUATION VISANT À ÉBRANLER DES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES EN ÉLECTROCINÉTIQUE

Guy Robardet

Nous présentons ici une recherche en cours dont nous donnons les premiers résultats. Elle concerne l'introduction de l'électrocinétique avec des élèves de collège ou de lycée. L'objectif de ce travail est d'amener les élèves à comprendre qu'un circuit électrique fonctionne comme un système complexe dans lequel tous les composants sont en interaction et, qu'en particulier, l'intensité du courant dans la branche du générateur ne dépend pas seulement des caractéristiques de celui-ci mais aussi de celles des récepteurs et de la façon dont ils sont montés dans le circuit. Il s'agit ici de tenter d'ébranler les principales conceptions des élèves relatives au courant électrique qui ont été bien étudiées en didactique de la physique et qui sont susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques puissants dans ce domaine de la physique. Le dispositif d'enseignement expérimental ici fait largement appel à la théorie des situations élaborée par Brousseau dans l'enseignement des mathématiques et à la modélisation.

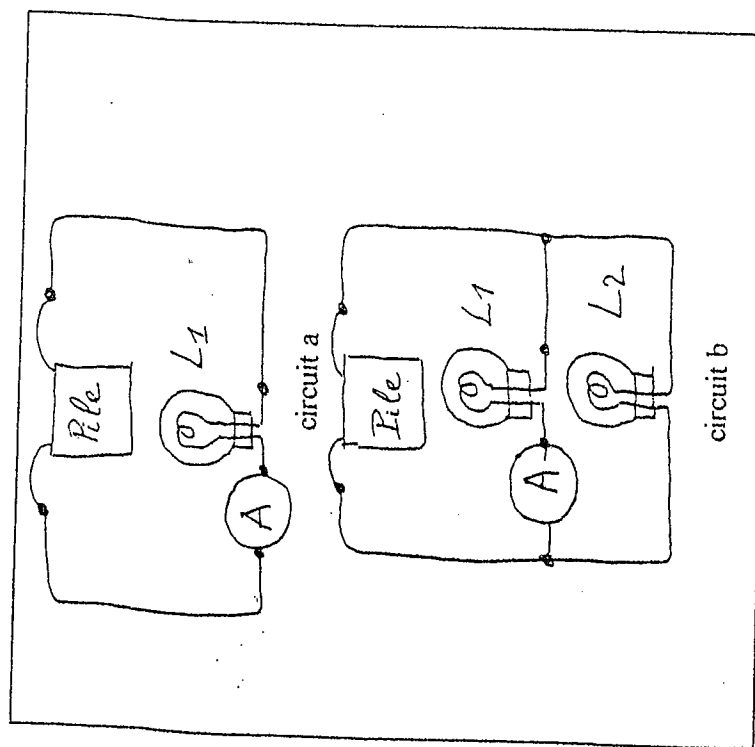
Nous présentons ici un travail qui concerne l'introduction de l'électrocinétique avec des élèves de collège ou de lycée. L'objectif de celui-ci est d'amener les élèves à comprendre qu'un circuit électrique fonctionne comme un système complexe dans lequel tous les composants sont en interaction et, qu'en particulier, l'intensité du courant dans la branche du générateur ne dépend pas seulement des caractéristiques de celui-ci mais aussi de celles des récepteurs et de la façon dont ils sont montés dans le circuit. Ce faisant, il s'agit ici de tenter d'ébranler les principales conceptions des élèves relatives au courant électrique qui ont été bien étudiées en didactique de la physique et qui sont susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques puissants dans ce domaine de la physique.

1. EN QUOI CONSISTENT LES OBSTACLES AUXQUELS NOUS SOMMES ATTAQUÉS ?

Quelques exemples d'erreurs, parmi beaucoup d'autres, nous permettront de mieux comprendre en quoi consistent ces conceptions et en quoi elles font obstacle à la construc-

tion du savoir. On a demandé à des élèves d'une classe de seconde de lycée de résoudre l'exercice suivant.

Dans le circuit a, représenté ci-dessous, l'ampèremètre indique une intensité de 100 mA. On monte alors une deuxième lampe identique à la première selon le circuit b. Quel est l'ordre de grandeur de l'indication alors fournie par l'ampèremètre ?



À cette question, 27 des élèves interrogés répondent de manière erronée que l'intensité vaut alors 50 mA, et 8 seulement donnent la réponse correcte, à savoir que l'indication de l'ampèremètre reste voisine de 100 mA.

Voici, à titre d'exemple, quelques explications données par les premiers :

"L'intensité se partage entre les deux branches. Comme L1 et L2 sont identiques, l'intensité va se partager en deux."

"L1 ne reçoit qu'une partie de l'intensité alors qu'avant elle recevait la totalité."

"50 mA : c'est la loi des nœuds."

"L'ampèremètre va afficher 50 mA car il y a un nœud et le courant se divise en deux."

des erreurs qui ne sont pas le fait du hasard...

201

Ces erreurs ne sont pas accidentelles mais résultent d'un raisonnement défectueux. Pour ces élèves, la cause du courant dans le circuit est la pile. Puisque la modification du circuit ne concerne pas cette dernière, elle continuera à fournir toujours le même courant d'intensité 100 mA qui se partagera dans les deux lampes en deux courants de 50 mA. Cette conception dite "du générateur à courant constant" a été étudiée par Johsua et Dupin qui soulignent sa pertinence pour aborder une large classe de problèmes : "La représentation 'à débit constant' est parfaitement efficace dans l'analyse d'un circuit pris en tant que tel puisque toutes les grandeurs y sont stationnaires (y compris donc le courant délivré par la pile). Or ceci représente la très grande majorité des problèmes proposés aux élèves." (Johsua & Dupin, 1989).

Autre exemple, lors d'un stage de formation à la construction de montages électroniques destiné à de futurs enseignants de technologie de collège, nous avons remarqué que ces derniers protégeaient les diodes qu'ils montaient en leur associant une résistance en série qu'ils plaçaient systématiquement à l'entrée de la diode. À notre question de savoir pourquoi ils ne la montaient pas, par exemple, à la sortie, plusieurs d'entre eux firent preuve à notre égard d'une sorte de doute concernant nos connaissances en électricité : puisque la résistance sert à protéger la diode à quoi bon la monter à la sortie de celle-ci ? "Si la diode est montée avant, elle reçoit tout le courant et elle claque". Manifestement, dans l'esprit de ces derniers, le rôle de la résistance était, en quelque sorte, d'absorber un trop plein de courant pour ne laisser à la diode montée derrière que ce qui lui était nécessaire. "La résistance c'est comme un bouclier ; si on ne la met pas devant elle ne sert à rien." Ce dernier exemple illustre bien les difficultés rencontrées dans l'enseignement de l'électrocinétique avec le concept de conservation de l'électricité, concept qui heurte la conception profondément enracinée selon laquelle le courant s'affaiblit en traversant les récepteurs du circuit. Closset (1989) a bien étudié cette conception toujours présente chez la majorité des élèves de l'enseignement secondaire qu'il a interrogés. Il cite, à ce sujet le dialogue suivant.

Élève : "Je suppose que les électrons possèdent en eux une force qui est capable de faire de la lumière (dans une lampe). Si ici (une borne de la pile) il y a un débit de 10000 électrons par seconde, là (l'autre borne) il n'en revient peut-être que 9000."

Question : "Et les autres où sont-ils passés ?"

Élève : "Ils sont devenus de l'énergie... ils ne sont plus des électrons."

Les recherches en didactique des sciences physiques ont montré que ces conceptions largement présentes chez les élèves et les étudiants étaient susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques vis-à-vis du modèle canonique

...qui révèlent des conceptions et des modes de raisonnement...

...susceptibles de s'ériger en obstacles épistémologiques...

de l'électrocinétique qu'il s'agit d'enseigner. Deux raisons au moins permettent d'expliquer ce caractère d'obstacle.

La première tient à la pertinence de ces conceptions et à leur simplicité pour interpréter les phénomènes de la vie quotidienne : lorsqu'une pile alimente une lampe, il y a quelque chose qui s'use ; chacun sait qu'il faudra bien un jour changer la pile. Pour l'élève, ce qui s'use ne peut être que le "courant" ainsi, pour lui, à la sortie de la lampe ou bien il y a moins de charges ou bien elles vont moins vite. On voit bien que, mise en concurrence avec le modèle enseigné qui ne peut rendre compte du phénomène qu'au prix d'une distinction entre les notions d'intensité, d'énergie et de potentiel, la conception est bien plus économique.

La seconde raison concerne le raisonnement sur lequel se structurent ces conceptions. Il contient, en effet, les principaux ingrédients du raisonnement naturel de sens commun tel que le décrit Viennot (1996). En premier lieu, il privilégie la causalité linéaire sur le raisonnement systémique qui devrait prévaloir ici. Le recours à cette structure logique particulièrement simple lui donne l'apparence de l'exactitude (le générateur est le responsable du courant ; si on ne change pas le générateur, alors il n'y a pas de modification de l'intensité. Une lampe consomme du courant ; il y en a donc moins à la sortie qu'à l'entrée). En second lieu, il est fréquemment séquentialisé dans le temps en s'appuyant sur l'idée d'un objet (ici le courant) à propos duquel les événements considérés sont présentés comme successifs : le courant sort du générateur, puis arrive à la première lampe qu'il traverse, il parvient ensuite à la lampe suivante etc. avant de retourner dans le générateur. Des phénomènes que la physique considère comme concomitants sont, à tort, interprétés en terme d'histoire et inscrits dans le temps : le courant part à l'aventure dans le circuit et en cours de route il lui arrive des choses. Ce type de raisonnement naturel, qualifié de séquentiel a été étudié par Closset (1983) en électricité. En troisième lieu, il procède par "réduction fonctionnelle" (Viennot, 1996) ce qui signifie que, alors que la physique interprète un phénomène au moyen de plusieurs grandeurs variant simultanément, la tendance est de n'en considérer qu'une seule à la fois ou d'en confondre plusieurs. Ici les variables du modèle canonique sont l'intensité, le potentiel et l'énergie alors que les élèves raisonnent avec une seule grandeur, pas toujours très bien définie, qu'ils appellent "le courant".

La pertinence apparente des explications données et les économies effectuées au niveau du raisonnement utilisé spontanément par les élèves sont très certainement responsables de la constitution de ces conceptions en obstacles épistémologiques. Ce sont ces obstacles qu'il s'agit de dépasser comme le soulignent Johsua et Dupin : "La difficulté de l'entreprise doit se comprendre au regard de l'efficacité relative de ce "sens commun" puisque, après tout, ce sont bien les

... en raison
de leur
pertinence...

... et de leur
caractère
économique

schèmes qui lui sont liés qui permettent à tout un chacun de se mouvoir et d'agir sur les objets de la vie quotidienne. Alors que d'un autre côté, les problèmes scientifiques sont des problèmes rares, au sens qu'il est rare de les trouver sous une forme adéquate dans la vie quotidienne. [...] On trouve donc d'un côté les conceptions et modes de raisonnement anciens et bien ancrés, parfois bien adaptés à la très grande majorité des situations de la vie courante ; de l'autre des savoirs plus techniques, exigeant parfois une rupture conséquente avec le sens commun, en vue de traiter des problèmes paraissant un peu spéciaux. La partie est inégale et appelle, pour être gagnée, fut-ce en partie, des stratégies didactiques fort particulières." (Johsua et Dupin, 1993, p.133)

2. QUELLES SONT LES IDÉES DIRECTRICES QUI FONDENT LA STRATÉGIE QUE NOUS AVONS ADOPTÉE ?

L'objectif de notre recherche a donc consisté à prendre en compte les conceptions et modes de raisonnement relatifs à l'électrocinétique décrits précédemment et à construire un dispositif d'enseignement destiné à les mettre en difficulté. Les idées directrices auxquelles nous nous sommes référés ont été les suivantes : l'intensité du courant fourni par le générateur dépend aussi du reste du circuit ; le courant assure la transmission de l'énergie du générateur vers les récepteurs mais le courant et l'énergie doivent être distingués.

Pour construire ce dispositif d'enseignement, nous nous sommes appuyés sur un modèle interactionniste d'apprentissage de type piagétien selon lequel le sujet apprend en s'adaptant à un milieu suivant le double processus d'assimilation-accommodation. Pour cela nous nous sommes fortement inspirés des travaux de Guy Brousseau relatifs à la notion de situation "a-didactique" en mathématiques (Brousseau, 1986). Cet auteur caractérise une telle situation par la nature des interactions, relatives à un savoir donné, qui relient l'élève, le milieu et l'enseignant. Comme nous allons le voir par la suite, ici l'élève modifie son rapport au savoir en construisant ses connaissances comme réponses aux exigences du milieu (et non au désir de l'enseignant). Le milieu, à la fois générateur de sens vis-à-vis du savoir en jeu et producteur d'un système de contraintes qui conditionnent le fonctionnement de la connaissance, rétroagit sur l'élève en termes de sanction positive ou négative à son action et contribue ainsi fortement à la validation des connaissances. Le rôle de l'enseignant consiste tout d'abord à construire et à organiser le milieu par contextualisation du savoir en jeu afin de produire sur l'élève les effets attendus. Dans ce but, l'enseignant délègue à l'élève et lui fait

une situation
où l'élève répond
aux exigences
du milieu...

... qui rétroagit
sur l'élève

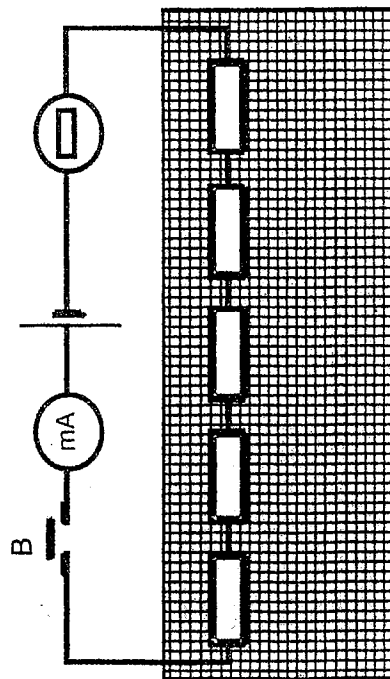
accepter la responsabilité de la situation d'apprentissage. Ce processus de transfert de responsabilité qui conditionne le fonctionnement "à didactique" de la situation est qualifié par Brousseau de "dévolution". Ce n'est qu'ensuite que l'enseignant transformera, avec les élèves, les connaissances construites par eux en savoir dans une phase qualifiée d'"institutionnalisation" (Brousseau, 1988). Nous reviendrons sur l'étude de ces caractères dans l'analyse de nos résultats. Il nous faut, auparavant présenter le dispositif d'enseignement que nous avons élaboré.

3. LE DISPOSITIF D'ENSEIGNEMENT : LE JEU DES RÉISTORS

La situation fondamentale autour de laquelle s'articulent les différentes phases de l'enseignement consiste en un jeu qui, au départ, se joue à deux joueurs. Il utilise un matériel constitué par une plaque de connexions sur laquelle peuvent être branchées de toutes les façons possibles au maximum cinq résistances identiques. Cette plaque est montée dans le circuit, représenté ci-dessous, en série avec une alimentation de tension, un milliampèremètre numérique un bouton poussoir et une lampe à incandescence.

3.1. Règles du jeu

Le but du jeu est de marquer des points contre l'adversaire en modifiant le nombre et/ou la disposition des résistors sur la plaque de manière à augmenter la valeur affichée sur l'écran du milliampèremètre. Toute action sur le générateur ou sur les autres éléments du circuit est interdite.



Il n'est pas nécessaire que tous les résistors soient montés dans le circuit, mais tous ceux qui le sont doivent être parcourus par un courant. Toutes les associations de résistors

(en série, en parallèle ou mixtes...) sont autorisées. Les modifications doivent être effectuées sans appuyer sur le bouton poussoir B : celui qui joue modifie le circuit en montant sur la plaque les résistors comme il l'entend puis il établit le passage du courant en appuyant sur le bouton B. Le joueur dispose pour cela d'une minute. Passé ce délai, il doit céder la place à son concurrent. On ne peut procéder par essais et erreurs. Chaque coup compte. On n'a pas le droit de prendre des notes pendant le jeu. Chaque modification doit être réalisée en vue d'obtenir une augmentation de la valeur indiquée par le milliampèremètre. Si celle-ci se produit, le joueur marque un point et continue. Si, au contraire, la valeur affichée diminue, le joueur cède la place à son concurrent : les étapes faisant l'accord des deux joueurs sont alors comptabilisées au bénéfice de ce dernier qui reprend le jeu au niveau de l'étape litigieuse. En cas de désaccord total, les cinq résistors sont replacés dans leur position initiale (voir figure) et le jeu est repris au début. On joue en temps limité : 30 minutes. Celui qui a gagné est celui qui a réussi à marquer le plus de points sans céder sa place.

3.2. Déroulement du jeu

Le jeu se déroule pendant deux heures au cours de la première séance de travaux pratiques consacrée à l'électrocinétique. Il comporte cinq phases.

• Phase 1 (action) 30 minutes

Les élèves jouent par deux l'un contre l'autre pendant trente minutes selon les règles précédentes. Celui qui joue agit sous le contrôle de l'autre (respect des règles).

• Phase 2 (formulation) 30 minutes

La classe est divisée en équipes de quatre à six élèves qui jouent les uns contre les autres. Les membres de chaque équipe se concertent afin de rechercher la meilleure stratégie. Pendant cette phase les élèves ont le droit de prendre des notes mais pas de manipuler sur le circuit. Chaque équipe élabore sur une grande feuille de papier la stratégie qu'elle estime gagnante sous la forme des schémas successifs d'associations de résistors. Aucun contrôle expérimental n'est accepté lors de cette phase. Les équipes affichent ensuite les stratégies qu'elles ont élaborées.

• Phase 3 (validation) 20 minutes

Chaque affiche est examinée par les autres équipes. Chaque étape proposée est alors acceptée comme vraie ou rejetée comme fausse. À ce stade, des contrôles expérimentaux sont autorisés pour trancher entre les différents points de vue. À l'issue de ce travail, les erreurs étant identifiées pour chaque affiche, on calcule les points marqués par chacune de équipes en comptant pour un point chaque étape accep-

but du jeu :
augmenter
la valeur
indiquée par le
milliampèremètre

le jeu se déroule
en 5 phases

le jeu
des résistors :
un dispositif visant
l'apprentissage
par adaptation
à une situation

A. 202

tée et en déduisant du total un point par erreur identifiée. L'équipe gagnante est celle qui marque le plus de points.

• Phase 4 (formulation) 20 minutes

Il s'agit ici d'apprendre à gagner. Dans ce but, les équipes doivent élaborer des règles empiriques permettant de rendre compte des variations de l'intensité dans la branche du générateur en fonction des modifications apportées aux associations de résistors. Lorsque, dans chaque équipe, il y a accord sur les règles empiriques, celles-ci sont écrites et affichées.

• Phase 5 (validation) 20 minutes

Un membre de chaque équipe présente les règles élaborées à la classe et en justifie oralement la validité en s'appuyant sur les stratégies gagnantes mises au point dans les phases précédentes. Un débat, portant sur l'ensemble des productions, permet d'élaborer la formulation qui sera retenue, chaque règle est écrite sous le contrôle critique des équipes concurrentes.

4. PREMIERS RÉSULTATS

Le protocole ci-dessus a été proposé et étudié à quatre reprises : deux fois en classe de Troisième de collège (niveau 9) et deux fois en Seconde de lycée (niveau 10). Dans chaque cas, le jeu a été proposé au deuxième semestre et n'a été précédé d'aucun enseignement d'électricité pendant l'année. Le recueil des données a été effectué par enregistrement vidéo des élèves et des groupes pendant les séances. Les productions des élèves et des équipes ont également été utilisées. L'examen des bandes semble permettre dès à présent une première analyse du processus d'appropriation du jeu par les élèves et de leur implication. Il témoigne de plus, avec les productions des groupes, de la nature et du niveau des connaissances construites.

4.1. Étude du fonctionnement des différentes phases du jeu

Toutes les phases se sont toujours déroulées comme prévu : le souci de gagner, l'esprit de compétition entre les individus (phase 1) et entre les équipes (phases 2 et 3) ont créé un enjeu important qui semble avoir très fortement mobilisé les élèves autour des tâches qui leur ont été proposées. Le contrat entre les élèves n'est plus de type coopératif mais compétitif ainsi qu'en témoignent, à titre d'exemple, les extraits suivants :

Véronique : Plus que cinq secondes... il te reste une seconde
Allez stop !

un contrat
entre les élèves
plus compétitif
que coopératif...

Olivier : Vas-y branche l... branche l... 77... c'est pas vrai !
Ben, tu m'as dépassé...

Les phases de formulation et de validation ont, en particulier, montré le très grand investissement des élèves dans le processus de construction des connaissances. L'extrait suivant, pris lors de la phase 2 alors que les équipes doivent élaborer sur papier une stratégie gagnante, rend bien compte de ce phénomène.

Marie : Il faudrait trouver des trucs mixtes...

Philippe : Je crois qu'il y a un truc avec deux en dérivation... Logiquement...

Marie : ... Eh bien voilà ! Quand on n'en met qu'une là comme ça, ça fait en série... donc... la boucle... y en aura deux et ce sera juste après...

Alain : Regarde, là t'en a trois en série, t'en remets une en dérivation toi...

Magali : Ouais, ici voilà... Ça y est, j'ai compris... Donc là on passe à un autre truc donc là il faudrait deux en dérivation.

Alain : Non en série.

Magali : En dérivation... Parce qu'autrement ça fait comme avant... Et puis les deux dernières, après, en série...

L'enseignant s'est toujours trouvé très peu sollicité et lorsqu'il l'a été, ce fut pour arbitrer des conflits de points de vue relatifs au respect des règles et non pour assister des élèves en difficulté par rapport à la tâche.

Pierre : Madame, venez voir, j'ai fait tout à l'heure 117 et maintenant je fais 112 avec le même branchement.

Maxime : Mais non ! C'est pas vrai Madame, il fait 112, ça fait moins !

Le recours au milieu constitué par le montage électrique a été systématique, notamment lors des phases 1 et 3, pour trancher et donc valider les propositions élaborées par anticipation. L'exemple ci-dessous concerne une vérification qui pose problème parce qu'elle donne le même résultat pour deux montages apparemment différents mais en réalité équivalents. Les élèves n'avaient pas prévu ce phénomène.

Pierre : Attends, attends l... (il vérifie le montage)

Marie : (elle appuie sur le bouton)... 29,3

Pierre : (reprend l'autre montage)... 29,4... 29,3... Eh ça marche pas, c'est pareil !...

Maxime : Ça marche pas, c'est les deux mêmes...

Marie : C'est pas possible ! ?...

4.2. Étude des connaissances construites

Remarquons tout d'abord que les règles du jeu ont été élaborées en vue de favoriser chez les élèves les changements conceptuels attendus. Toute l'activité repose en effet sur la recherche d'une modification de l'intensité du courant dans la branche du générateur, obtenue uniquement en agissant sur le nombre et le montage des récepteurs, alors que le générateur n'est pas modifié. Ainsi tout concourt à ce que les élèves admettent que l'intensité n'est pas seulement la

le milieu
sanctionne
les anticipations

... et des situations
qui témoignent
du très grand
investissement
de ceux-ci

conséquence des caractéristiques du générateur mais qu'elle dépend en fait de la composition et de la structure du circuit tout entier. De plus, la nécessité de prévoir l'évolution de l'intensité tout au long du jeu les oblige à recourir à des raisonnements complexes qui préfigurent ceux qui interviendront ultérieurement lorsque, munis du modèle canonique, ils devront résoudre un problème de circuit.

Au départ, la construction des connaissances est fortement liée au désir de gagner comme en témoignent les extraits donnés précédemment. Dans ce cadre la connaissance, associée au contexte du jeu est d'abord construite par les élèves en tant que meilleure stratégie pour battre son adversaire. C'est ainsi que les enseignants expérimentateurs nous ont signalé, à plusieurs reprises, que des élèves revenaient spontanément la semaine suivante avec des propositions souvent très élaborées de stratégies gagnantes dont certaines comportaient plus de 20 étapes classées correctement. Les règles empiriques élaborées et discutées lors des phases 4 et 5 attestent d'un haut niveau d'exigence cognitive de la part des élèves ainsi que nous pouvons le constater dans l'exemple suivant qui concerne le débat de la phase 5.

Laetitia (qui présente à la classe la production de son équipe) : *La série diminue d'intensité, le montage en parallèle augmente l'intensité. En série, plus il y a de résistors, plus l'intensité diminue, en parallèle, plus il y a de résistors plus l'intensité augmente.*

Laurent : *Madame, est-ce que je pourrais dire ceci ? Heu... Quand on a un circuit en dérivation... si, on rajoute des résistors en série, l'intensité diminue.*

(Une voix) : *Ça dépend du nombre de résistors...*

Magali : *Ça dépend, ... ça dépend par rapport à quoi on part.*
Marie : *Oui mais par rapport à un montage donné, si on en met en série, ça va diminuer...*

Au cours de la séance, le statut de la connaissance a évolué, l'outil élaboré initialement dans le contexte du jeu comme stratégie gagnante a pris dans les phases 4 et 5 un caractère plus général. Le rôle de l'enseignant consistera ensuite à finir de décontextualiser cet outil au cours d'une phase d'institutionnalisation.

5. PROCESSUS DIDACTIQUES EN JEU DANS CES SITUATIONS

5.1. Étude du processus de dévolution et du fonctionnement a-didactique des situations

Les exemples ci-dessus, qui nous paraissent illustrer l'en-semble des données actuellement en notre possession, témoignent d'un fonctionnement du rapport au savoir que

Brousseau qualifie d'a-didactique en ce sens que "l'élève sait bien que le problème a été choisi pour lui faire acquérir une connaissance nouvelle mais [...] que cette connaissance est entièrement justifiée par la logique interne de la situation et qu'il peut la construire sans faire appel à des raisons didactiques." (Brousseau, 1986, p. 49). Brousseau définit, en effet, une situation a-didactique comme une situation dans laquelle interviennent l'élève, l'enseignant et le milieu avec les caractéristiques que nous donnons ci-dessous (Bessot, 1993).

• Le milieu est constitué par le système antagoniste de l'élève (ici le jeu des résistors et l'adversaire). Il est organisé par l'enseignant en fonction d'une intention didactique générale de sens vis-à-vis du savoir en jeu. Il est producteur d'un système de contraintes qui conditionnent le fonctionnement de la connaissance (ici les règles du jeu et les tâches à effectuer qui évoluent au cours des phases). Il rétroagit sur l'élève (*validation*) en termes de réponse positive ou négative à son action (c'est l'indication du milliampmètre qui décide de la suite).

• L'élève apprend en s'adaptant au milieu générateur de contradictions, de difficultés, de déséquilibres (assimilation, accommodation). Il modifie ainsi son rapport au savoir en construisant ses connaissances comme réponses aux exigences du milieu et non au désir de l'enseignant (il ne s'agit pas ici de deviner une réponse attendue par l'enseignant mais d'élaborer et de formaliser une stratégie gagnante).

• L'enseignant construit et organise le milieu, en fonction du savoir en jeu, en vue de produire sur l'élève les effets attendus (ici d'ébranler ses conceptions). Son rôle, pendant les phases d'action, de formulation et de validation, n'est pas de donner une réponse mais d'assurer le fonctionnement normal de la situation. Il doit donc permettre un changement de contrat didactique en faisant en sorte que l'élève, non seulement accepte les règles du jeu qui lui sont proposées, mais encore accepte, en s'investissant dans le jeu, la responsabilité de construire des connaissances en rapport avec la situation proposée. En jouant au jeu des résistors, les élèves savent bien qu'il s'agit pour eux de construire des connaissances de physique, ce qu'ils font en élaborant les règles empiriques (phase 4) puis en les discutant (phase 5). C'est ce processus de transfert de responsabilité du maître à l'élève que Brousseau désigne par le terme de *dévolution*. À la fin (ici après la phase 5), reprenant les connaissances construites par les élèves au cours de la situation, l'enseignant leur confère le statut de savoir au sens où, en les décontextualisant de la situation du jeu des résistors, il les fait apparaître en tant qu'outils susceptibles d'intervenir dans la résolution de problèmes différents. Brousseau qualifie ce processus d'*institutionnalisation*.

Comme on le voit, le fonctionnement a-didactique d'une situation est caractérisé par l'interaction privilégiée entre

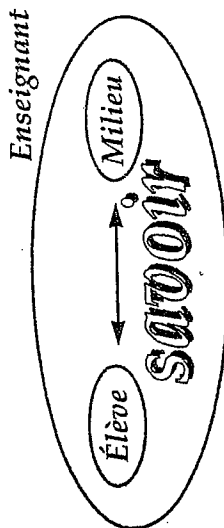
le fonctionnement
a-didactique
du jeu
des résistors...

...est lié à
des caractéristiques
du milieu, de l'élève
et de l'enseignant

la dévolution :
un transfert
de responsabilité
du maître
à l'élève

un jeu qui vise
le changement
conceptuel et
l'ébranlement
des obstacles

l'élève et le milieu, interaction réglée par les contraintes du milieu et non directement par l'enseignant. Bien sûr, le savoir en jeu est présent, mais en arrière-plan seulement jusqu'à la phase d'institutionnalisation. C'est ce qu'essaye de traduire le schéma suivant.

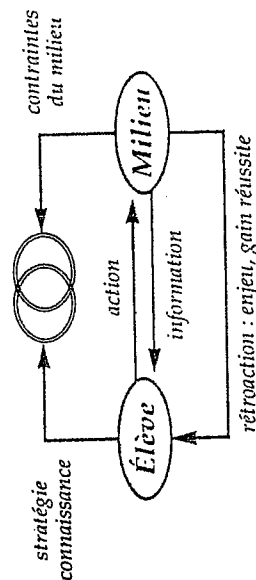


5.2. Caractérisation des phases utilisées dans le jeu des résistors

L'élève joue avec les règles du jeu. L'enseignant, de son côté, joue à changer ces règles. De là apparaissent différentes phases qui correspondent chacune à un système de contraintes particulier. Nous avons construit les différentes phases du jeu des résistors en nous inspirant toujours de la théorie de Brousseau. Nous en donnons ci-dessous les caractéristiques essentielles.

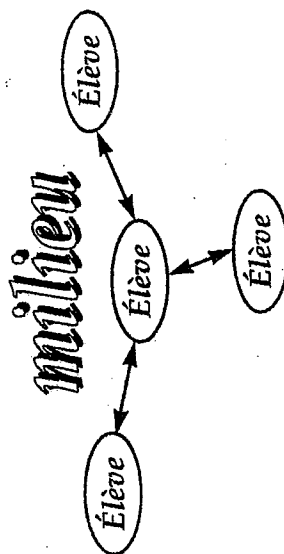
• Phase d'action

L'élève qui joue agit sur le milieu lequel lui renvoie de l'information : il a gagné et il marque un point ou bien il a perdu et il doit céder la place. Tout au long de cette phase, chacun des deux joueurs élabore sa stratégie personnelle et donc des connaissances pour gagner. Le respect des règles du jeu, constaté par l'adversaire, constitue l'essentiel des contraintes du milieu. L'enjeu est essentiellement constitué par la réussite censée témoigner de la supériorité de la stratégie du joueur face à celle de l'adversaire.



• Phases de formulation

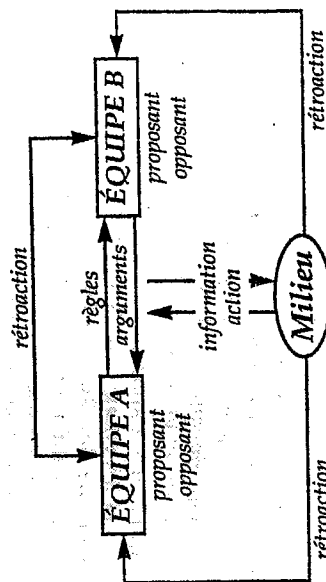
Elle sont essentiellement constituées par des discussions entre élèves d'une même équipe. Il s'agit, ou bien de comparer les diverses stratégies et de choisir celle que l'on va présenter aux autres, ou bien d'élaborer ensemble des règles empiriques. Au cours d'une phase de formulation, le milieu n'est présent que par la pensée, en arrière-plan des évocations mais il n'est plus matériellement disponible pour répondre aux questions qui apparaissent dans le débat.



le système actions-
rétroactions
est différent selon
les phases

• Phases de validation

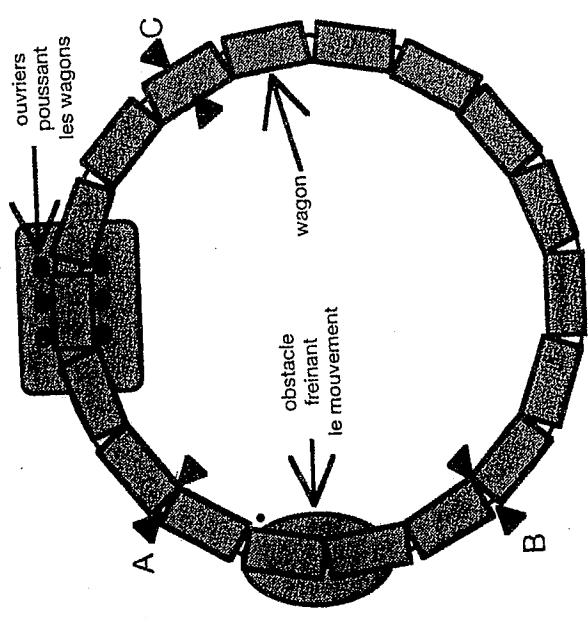
Lors de ces phases, il y a débat entre les équipes. La communication qui a lieu entre elles a pour fonction de faire qu'apparaissent des propositions et des oppositions à travers la formulation de règles ou d'arguments. Dans ce débat, les équipes sont à égalité de moyens et de droit. L'objectif est ici de valider des propositions. Pour ce faire, elles peuvent, en particulier recourir au milieu qui est à nouveau disponible et agir sur lui pour décider, en fonction des informations reçues en retour, de qui a raison et qui a tort. Il y a donc rétroaction du milieu sur les équipes. Mais les équipes peuvent également échanger des arguments et tenter de convaincre par la logique. Il y a donc également rétroaction entre les équipes.



6. INSERTION DU JEU DES RÉSISTORS DANS L'ENSEIGNEMENT DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE : IMPLICATIONS DIDACTIQUES

Rappelons que les cinq phases du jeu ont été conçues pour être introduites successivement dès le début de l'enseignement. Par conséquent, comme nous l'avons déjà dit, aucun travail en électrocinétiq ue n'avait été réalisé avec les élèves au cours de l'année avant le jeu des résistors. La mise en œuvre des cinq phases a été réalisée en une séance de deux heures ou en deux séances consécutives.

À la fin de la phase 5, les élèves disposent de deux règles empiriques qui peuvent s'énoncer de la manière suivante :
1. *Lorsqu'on ajoute un élément en série avec un autre élément (ou avec une association d'éléments), l'intensité du courant qui sort du générateur diminue.* 2. *Lorsqu'on ajoute un élément en parallèle sur un autre élément (ou sur une association d'éléments), l'intensité du courant qui sort du générateur augmente.*



le fonctionnement du circuit est interprété par l'analogie modélisante du train

Pour la suite, et afin de mieux rendre compte de ces phénomènes, nous nous sommes inspirés de la démarche utilisée par Johsua, démarche qui prend appui sur l'"analogie modélisante" du train. "Notre analogie (analogie abstraite fonctionnant comme une expérience de pensée et ne conduisant jamais à des manipulations pratiques) décrit le fonctionnement d'un train hypothétique. [...]. Un train circule dans un

circuit fermé. Il est constitué de wagons (pas de locomotive) rigidement liés entre eux et régulièrement espacés. Dans une gare, des ouvriers poussent avec une force constante sur les wagons qui passent devant eux. Des freins existent sur la voie, lesquels influencent la vitesse du train." (Johsua, 1989).

On l'aura compris : il y a analogie entre le train et notre circuit, les wagons et les charges, le mouvement des wagons et le courant électrique, la vitesse à laquelle passe un wagon en un point et l'intensité du courant en un point du circuit, les ouvriers poussant les wagons et le générateur, la force de poussée des ouvriers et la force électromotrice du générateur, l'importance du freinage et la résistance des résistors montés sur la plaque de connexion. Ainsi, l'analogie permet de comprendre, non seulement qu'une action sur les résistors du circuit puisse entraîner une modification de l'intensité du courant délivré par le générateur, mais encore que cette intensité soit la même tout au long de la branche contenant le générateur. De plus, l'analogie du train permet de résoudre une contradiction essentielle soulevée par Johsua : le fluide électrique se conserve sous sa forme matérielle tout en permettant, telle une courroie, la transmission de l'énergie du générateur vers les récepteurs.

Nous avons d'abord fait travailler les élèves en petits groupes autour des questions ci-dessous, chaque petit groupe devant successivement effectuer des prévisions précises et argumentées à partir d'exemples et suivies ensuite de vérifications expérimentales.

- L'ordre des composants intervient-il sur la valeur de l'indication du milliampermètre ?
- Si on monte le milliampermètre du côté de la lampe, l'indication sera-t-elle modifiée ? Si oui dans quel sens et pourquoi ?

Prenant appui sur les résultats obtenus par les groupes nous avons institué un modèle qualitatif de l'électrocinétiq ue (modèle donné en annexe). Avec des élèves de lycée, la suite de l'enseignement fut organisé de manière analogue, c'est-à-dire autour de situations-problèmes donnant lieu à des questions telles que :

- Comment prévoir la valeur de l'intensité du courant qui s'établit dans la branche du générateur ?
- Comment prévoir les intensités dans les différentes branches contenant les résistors ?
- Et si l'on remplace un résistor par un autre dipôle ? (lampe, diode, pile, etc.)

Le travail sur ces situations a permis d'instituer des modèles quantitatifs de plus en plus performants c'est-à-dire permettant de répondre à des questions de plus en plus nombreuses et correspondant à des circuits de plus en plus complexes (deux exemples de ces modèles sont donnés en annexe).

Comme on peut le constater, la transposition didactique adoptée dans cet enseignement peut être caractérisée par

un découpage du savoir à enseigner différent de celui qui est réalisé habituellement. Ici, nous nous sommes volontairement écartés d'un découpage fondé sur une séparation des concepts (l'intensité et ses lois de conservation, puis la différence de potentiel et sa loi d'additivité, puis les dipôles, la loi d'Ohm et les caractéristiques, etc.). Nous avons au contraire opté pour une organisation fondée sur la résolution de situations-problèmes de plus en plus complexes, concernant l'étude de circuits, et susceptibles de mettre à l'épreuve les conceptions et modes de raisonnement des élèves, en privilégiant toujours la construction du sens à travers une démarche de modélisation (Robardet, Guillaud, 1997). Les notions de bases sur lesquelles nous nous sommes appuyés dès le début furent celles de force électromotrice (E), d'intensité (I) et de résistance équivalente (R), liées ensuite entre elles par la relation $E = R.I$ (Loi de Pouillet), et définies au niveau du circuit tout entier. Toutes les grandeurs ont été introduites dans le respect d'un principe de nécessité selon lequel un élément théorique n'est introduit que pour résoudre un problème nouveau ; en particulier, la notion de tension n'a été introduite que lorsqu'elle est devenue nécessaire pour pouvoir déterminer les valeurs des intensités dans les branches autres que celle du générateur. Le modèle a été construit en plusieurs étapes selon une démarche d'emboîtement de modèles successifs. Chaque nouvelle situation faisant apparaître l'inadaptation du modèle précédent et la nécessité de le perfectionner pour résoudre, reprenant ainsi une démarche que nous avions déjà utilisée en mécanique (Robardet, 1995). Nous laissons le dernier mot à une élève à la sortie de la première séance sur le jeu des résistors : *Série, dérivation... tu sais, avant je mélangeais tout. Maintenant, c'est gravé là !*

Guy ROBARDET,
LIDSE Université Joseph-Fourier,
IUFM de Grenoble.

l'enseignement
est organisé
autour
de situations-
problèmes
de plus en plus
complexes

respect
d'un principe
de nécessité

K. 207

BIBLIOGRAPHIE

- BESSOT A., 1993, "Panorama des cadres théoriques de la didactique des mathématiques en France", *Séminaire du CIRADE "Connaissance, Représentation et Apprentissage"*, Publications de l'IQAM, Montréal, Québec.
- BROUSSEAU G., 1986, "Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques", *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 7-2, pp. 33-115.
- BROUSSEAU G., 1988, "Le contrat didactique : le milieu", *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, pp. 309-336.
- CLOSSET J.-L., 1983, *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*, Thèse, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L., 1989, "Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique", *Bulletin de l'Union des Physiciens*, N° 716, pp. 931-949.
- JOHSUA S., 1989, "Les conditions d'évolution de conceptions d'élèves", in N. Bednarczyk & C. Garnier Eds. *Construction des savoirs, obstacles & conflits*, CIRADE Agence d'Arc inc. Ottawa, pp. 306-314.
- JOHSUA S., DUPIN J.-J., 1989, *Représentation et modélisation : le "débat scientifique" dans la classe, et l'apprentissage de la physique*, Berne : Peter Lang, pp. 46-83.
- JOHSUA S., DUPIN J.-J., 1993, *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Paris : P.U.F., pp. 171-178.
- ROBARDET G., 1995, "Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique", *Didaskalia*, N°7, Paris, Bruxelles ; de Boeck, pp. 129-143.
- ROBARDET G., GUILLAUD J.-C., 1997, *Éléments de didactique des sciences physiques : théories, modèles, conceptions et raisonnement spontané*, Paris : PUF, Coll. Pédagogies d'aujourd'hui.
- VIENNOT L., 1996, *Raisonnement en physique : la part du sens commun*, Paris, Bruxelles : de Boeck.

ANNEXES

MODÈLE QUALITATIF DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE (PREMIER MODÈLE)

Usage du modèle et champ expérimental de référence
Ce modèle s'applique à tout circuit ne comportant que des dipôles. Il permet de prévoir le sens des variations de l'intensité du courant qui circule dans la branche du générateur lorsqu'on modifie le circuit en ajoutant ou en retirant un récepteur.

Notions du modèle

- ☐ Un matériau conducteur d'électricité est représenté comme un récipient **complètement rempli** de particules pouvant se déplacer à l'intérieur.
- ☐ Un circuit électrique est représenté par une suite fermée d'éléments conducteurs communiquant les uns avec les autres (les particules qui remplissent complètement le circuit pouvant passer de l'un à l'autre).
- ☐ Le **courant électrique** est représenté par la circulation des particules mobiles tout au long des éléments du circuit. Un élément particulier, appelé **générateur**, est responsable de cette circulation. Son rôle est de maintenir le mouvement des particules qui en sortent par le pôle positif et y entrent par le pôle négatif. Les autres éléments traversés par les particules sont appelés **récepteurs**.
- ☐ En un point du circuit, l'**intensité** du courant I (en Ampère A) est la grandeur qui représente la valeur du débit des particules en mouvement.
- ☐ La **force électromotrice** du générateur E (en Volt V) est la grandeur qui représente le pouvoir du générateur de mettre et de maintenir les particules mobiles en mouvement.
- ☐ La **résistance** R (en Ohm Ω) est la grandeur qui représente le pouvoir qu'a un élément ou un ensemble d'éléments de freiner le passage des particules mobiles.

Règles du modèle

1. Tout circuit est rempli de particules ; on ne peut ni en ajouter, ni en retirer, ni en détruire : **leur nombre est constant** pour un circuit donné.
2. Les particules mobiles présentes dans un circuit constituent un ensemble **incompressible**. Elles ne peuvent que circuler dans le circuit mais pas s'accumuler.
Ainsi, l'intensité du courant est la **même** en tous points d'une chaîne d'éléments montés en **série**. Les intensités se partagent en s'ajoutant dans les **dérivations**.
3. Lorsqu'on ajoute un élément en série avec un autre élément (ou avec une association d'éléments), on augmente la résistance de l'ensemble au passage du courant.
4. Lorsqu'on ajoute un élément en parallèle sur un autre élément (ou sur une association d'éléments), on diminue la résistance de l'ensemble au passage du courant.
5. L'intensité du courant qui traverse le générateur augmente :
 - lorsque la valeur de la force électromotrice du générateur augmente,
 - lorsque la résistance de l'ensemble des récepteurs diminue.

PREMIER MODÈLE QUANTITATIF DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE

Usage du modèle et champ expérimental de référence
Ce modèle permet de calculer l'intensité du courant qui circule dans la branche du générateur. Il s'applique aux circuits dont les récepteurs fonctionnent en régime linéaire (résistors) et dans lesquels la résistance interne du générateur est négligée.

Notions du modèle

(identiques à celle du modèle précédent)

Règles du modèle

1. L'intensité est la même en tout point d'une chaîne d'éléments montés en série. Les intensités se partagent en s'ajoutant dans les dérivations.
2. La résistance équivalente à 2 résistors montés en série est égale à la somme de leurs résistances individuelles : $R_{eq} = R_1 + R_2$
La résistance équivalente à deux résistors montés en parallèle est donnée par la règle :
$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$
3. L'intensité du courant qui parcourt la branche contenant le générateur est reliée à la force électromotrice du générateur et à la résistance équivalente de l'ensemble des résistors du circuit par la relation :
$$I = \frac{E}{R_{eq}}$$

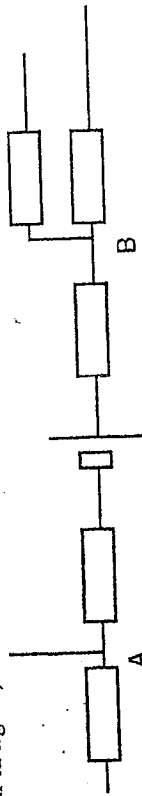
MODÈLE DE L'ÉLECTROCINÉTIQUE (MODÈLE FINAL)

Usage du modèle et champ expérimental de référence

Ce modèle permet de prévoir les intensités des courants qui circulent dans les branches du circuit. Il s'applique aux circuits dont les récepteurs sont des dipôles.

Notions du modèle

- ☐ Nœud : point d'un circuit relié à plus de deux composants (exemple : A et B sur la figure).
- ☐ Branche : portion de circuit située entre deux nœuds consécutifs (exemple : AB sur la figure).



- ☐ Le courant électrique est représenté par une circulation de charges positives sortant du générateur par le pôle positif et y entrant par le pôle négatif.
- ☐ Intensité I (en Ampère A) : grandeur qui représente le débit des charges électriques et qui se mesure au moyen d'un ampèremètre monté dans la branche concernée.
- ☐ Force électromotrice E (en Volt V) : grandeur qui représente le pouvoir du générateur à mettre en circulation des charges mobiles du circuit et qui se mesure au moyen d'un voltmètre monté sur le générateur non connecté au circuit.
- ☐ Résistance R (en Ohm Ω) : grandeur qui représente le pouvoir qu'a un résistor ou un ensemble de résistors de freiner le passage des charges mobiles et qui se mesure au moyen d'un ohmmètre monté sur le composant non connecté.
- ☐ Potentiel électrique V (en Volt V). C'est une grandeur qui caractérise l'énergie disponible dans une charge dont la circulation représente le courant électrique. Toutes les charges qui se trouvent en un même point A du circuit ont le même potentiel électrique noté V_A ou $V(A)$. Le potentiel électrique au point A se mesure avec un voltmètre dont la borne de référence (COM) est branchée au pôle négatif du générateur et dont la borne de fonction (V) est branchée en A.

Règles du modèle

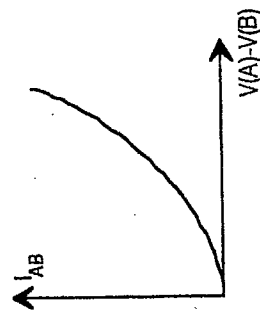
1. L'intensité se conserve en tout point d'une même branche.
L'intensité se conserve en se partageant ou en se regroupant en tout nœud.
2. La résistance équivalente à 2 résistors montés en série est égale à la somme de leurs résistances individuelles : $R_{eq} = R_1 + R_2$
La résistance équivalente à deux résistors montés en parallèle est donnée par la règle :

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I = \frac{E}{R_{eq}}$$

3. L'intensité du courant qui parcourt la branche contenant le générateur est reliée à la fém du générateur et à la résistance équivalente de l'ensemble des résistors du circuit par la relation :
 4. Toutes les charges d'une même connexion sont au même potentiel.
 5. Une charge qui traverse un composant cède à celui-ci, ou reçoit de celui-ci, de l'énergie. Ainsi le potentiel électrique V diminue lorsqu'elle traverse un récepteur. Il augmente lorsqu'elle traverse le générateur. $V = 0$ au pôle négatif du générateur.
 6. La diminution du potentiel entre l'entrée A et la sortie B d'un récepteur dépend de l'intensité I_{AB} du courant qui le traverse. Cette dépendance peut être représentée par une fonction croissante (f) telle que : $V_A - V_B = f(I_{AB})$
- ⇒ Si on modélise le récepteur AB par une loi linéaire sa résistance est une constante R donnée par la relation :

$$R = \frac{V_A - V_B}{I_{AB}}$$



⇒ Si nécessaire, un modèle plus précis des fonctionnements possibles d'un dipôle récepteur peut être obtenu par la courbe représentative de la fonction f appelée caractéristique du dipôle.

7. Le potentiel du pôle positif P du générateur est donné par la relation $V_P = E - r \cdot I$ dans laquelle E est la fém et r la résistance interne du générateur (si cette dernière est négligée alors $V_P = E$)

ANNEXE VI

EVALUATIONS

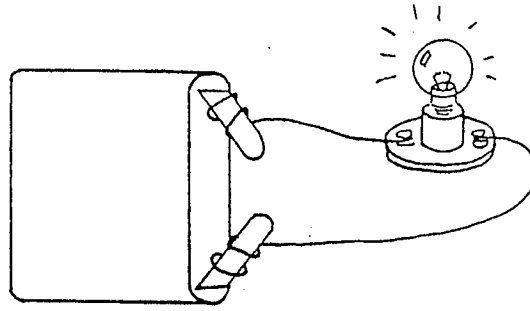
Questionnaires après enseignement

QUESTIONNAIRE : EVALUATION d' ELECRICTE en fin de 2°.

10 Essais.

QUESTION I :

La lampe est reliée à la pile.
La lampe éclaire.

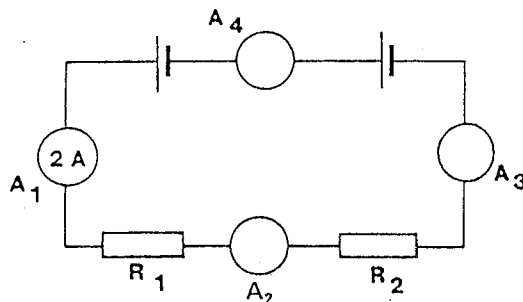


Lire attentivement les différentes affirmations, puis cocher la bonne case :

	vrai	faux	je ne sais pas
1 - La lampe consomme tout le courant électrique.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 - La lampe consomme un peu du courant électrique.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 - Tout le courant électrique circulant de la pile à l'ampoule retourne à la pile.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

QUESTION II :

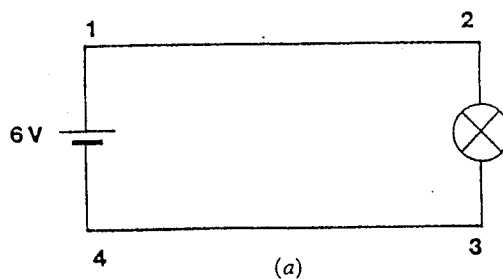
Dans le circuit dessiné ci-dessous, les résistances R_1 et R_2 sont différentes.



Il y a quatre ampèremètres dans le circuit. A_1 indique 2A. Ecris sur chacun des autres ce que tu penses qu'il indiquera.

QUESTION III :

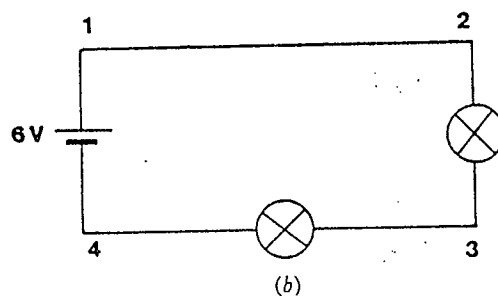
Observer le circuit suivant :



Compléter par les valeurs des tensions entre les points :

1 et 2 : V, 2 et 3 : V, 3 et 4 : V.

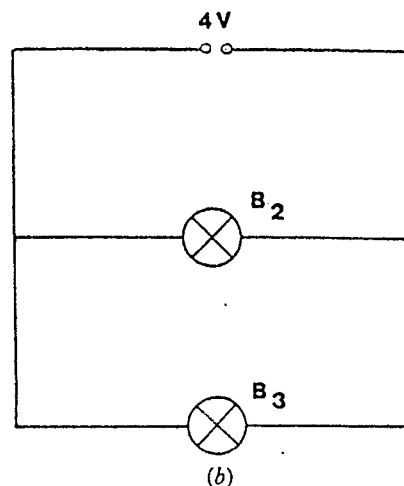
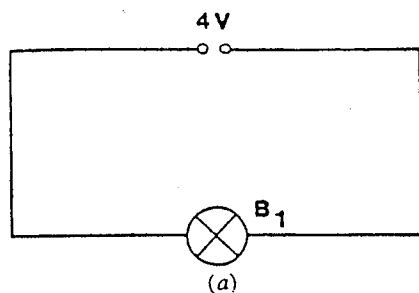
Maintenant une deuxième lampe identique est ajoutée entre les points 3 et 4 :



Compléter par les valeurs des tensions , dans le circuit avec deux ampoules, entre les points :

1 et 2 : V, 2 et 3 : V, 3 et 4 : V.

QUESTION IV : Dans les circuits (a) et (b) les deux générateurs sont identiques et toutes les ampoules sont identiques :

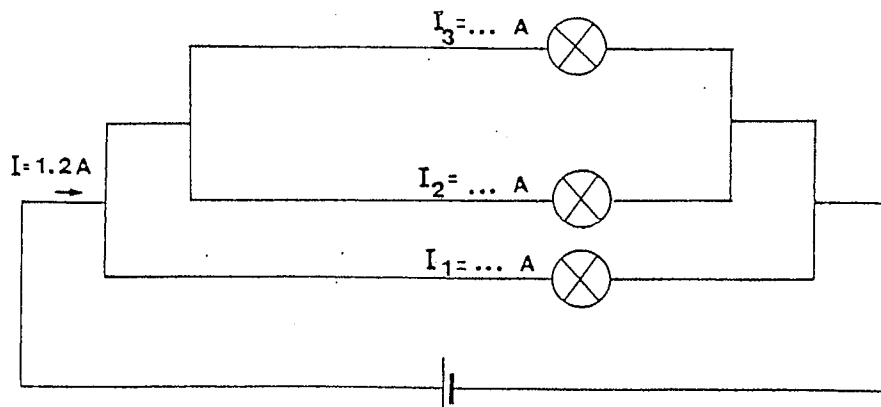


Lire attentivement les différentes affirmations, puis cocher la bonne case :

	vrai	faux	je ne sais pas
1 - La tension aux bornes de l'ampoule B ₂ est égale à la tension aux bornes de B ₃ .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2 - La tension aux bornes de l'ampoule B ₂ est plus faible qu'aux bornes de B ₁ .	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3 - Le courant électrique traversant l'ampoule B ₂ est plus faible que celui traversant B ₁	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

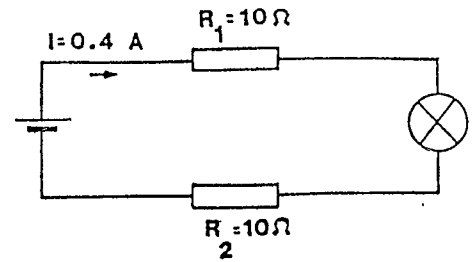
QUESTION V :

Dans le circuit ci-dessous, toutes les ampoules sont de même type. Compléter les courants I₁, I₂, I₃ circulant dans les fils :



QUESTION VI :

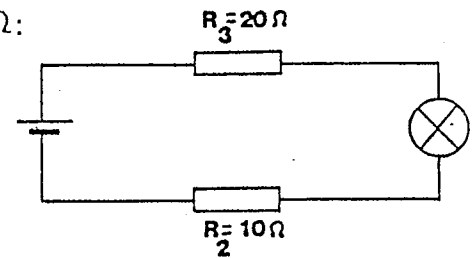
Dans le circuit ci-dessous l'intensité du courant est 0,4A.



Par la suite, la résistance R1 puis la résistance R2 seront changées, le générateur et la lampe restant les mêmes.

1° changement :

La résistance R1 = 10 Ω est remplacée par la résistance R3 = 20 Ω :



Comparer le courant dans le second circuit avec le courant dans le premier. Mettre une croix dans la case correspondant à la réponse correcte :

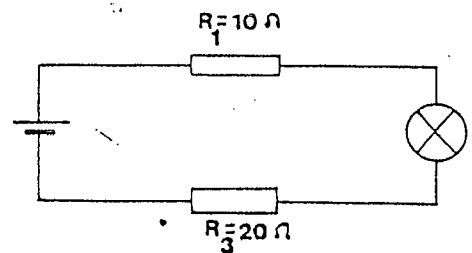
vrai

- 1 - L'intensité du courant dans l'ampoule est inférieure à 0,4A.
- 2 - L'intensité du courant dans l'ampoule est 0,4A comme avant.
- 3 - L'intensité du courant dans l'ampoule est supérieure à 0,4A.

☐
☐
☐

2° changement :

La résistance R1 = 10 Ω reprend sa place initiale. Puis la résistance R2 = 10 Ω est remplacée par la résistance R3 = 20 Ω.



Comparer le courant dans le troisième circuit avec le courant dans le premier. Mettre une croix dans la case correspondant à la réponse correcte :

vrai

- 1 - L'intensité du courant dans l'ampoule est inférieur à 0,4A.
- 2 - L'intensité du courant dans l'ampoule est 0,4A comme avant.
- 3 - L'intensité du courant dans l'ampoule est supérieure à 0,4A.

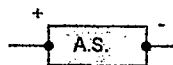
☐
☐
☐

(A)

Mai 99 Seconde
Mai 00 1^{er} S.

QUESTIONNAIRE : Evaluation d'électricité en fin de 2^o.

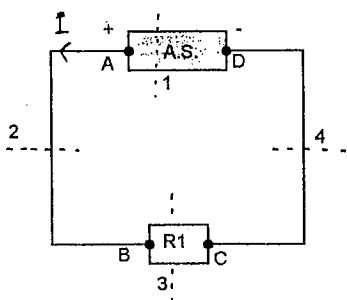
Dans toutes les questions, le **générateur** est une alimentation stabilisée : la **d.d.p.** à ses bornes est considérée **constante**. Le générateur est symbolisé par :



Pour répondre entoure les réponses qui te paraissent exactes, et surtout **explique** ton choix.
Nous utiliserons le symbolisme : plus grand que > identique à = plus petit que <

Question I

Soit le circuit constitué d'une alimentation stabilisée A.S. et d'un dipôle récepteur de résistance R1 :



On demande de comparer :

- 1 - l'intensité du courant traversant :
- le générateur I_1
 - le conducteur AB I_2
 - le récepteur BC I_3
 - le conducteur CD I_4
- 2 - la d.d.p. aux bornes des deux dipôles.

Pour répondre, entourer les réponses exactes :

$I_1 < I_2$	$I_2 < I_3$	$I_3 < I_4$	$I_2 < I_4$	$U_{AD} < U_{BC}$
$I_1 = I_2$	$I_2 = I_3$	$I_3 = I_4$	$I_2 = I_4$	$U_{AD} = U_{BC}$
$I_1 > I_2$	$I_2 > I_3$	$I_3 > I_4$	$I_2 > I_4$	$U_{AD} > U_{BC}$

Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible (si tu ne sais pas répondre, explique ce qui te gêne)

1 - intensité :

I_1 I_2 car :

I_2 I_3 car :

I_3 I_4 car :

I_2 I_4 car :

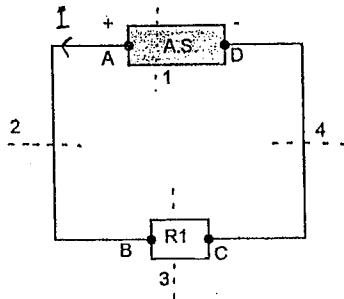
2 - d.d.p. :

U_{AD} U_{BC} car :

Question II

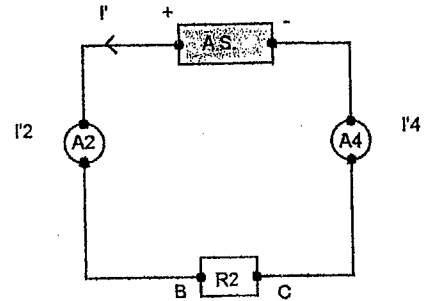
Le montage est celui de la question I, mais la valeur de la résistance du dipôle BC diminue pour prendre une valeur R_2 . Les intensités seront notées I' et les d.d.p. seront notées U' .

Rappel du montage de la question I



Montage de la question II

$R_2 < R_1$



1 - On demande de comparer les valeurs de l'intensité du courant notées I' à ce qu'elles étaient à la question I :

et explique tes choix le plus clairement possible :

$$I'_2 < I_2$$

$$I'_2 = I_2$$

$$I'_2 > I_2$$

et :

$$I'_4 < I_4$$

$$I'_4 = I_4$$

$$I'_4 > I_4$$

2 - On demande de comparer la d.d.p. aux bornes du dipôle BC :

explique ton choix, le plus clairement possible :

$$U'_{BC} < U_{BC}$$

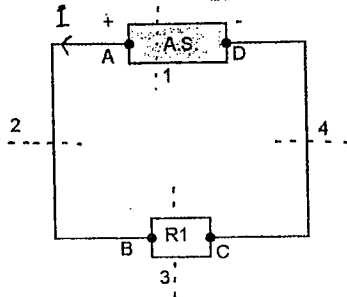
$$U'_{BC} = U_{BC}$$

$$U'_{BC} > U_{BC}$$

Question III

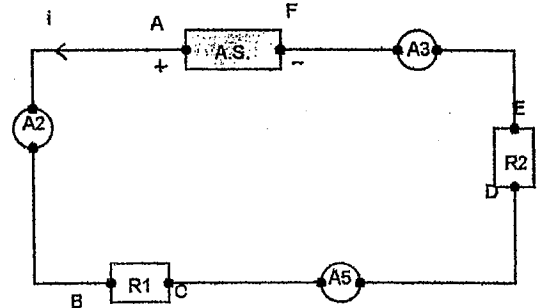
Les dipôles récepteurs utilisés dans les questions I et II sont maintenant montés en série avec le même générateur. Les intensités du courant seront notées i .

Rappel du montage de la question I



Montage de la question III

$$R_2 < R_1$$



1 - On demande de comparer les nouvelles valeurs de l'intensité i du courant entre elles, et aux valeurs qu'elles avaient à la question I :

prévisions : Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible :

$$i_2 < I_2$$

$$i_2 = I_2$$

$$i_2 > I_2$$

$$i_3 < I_4$$

$$i_3 = I_4$$

$$i_3 > I_4$$

$$i_5 < i_3$$

$$i_5 = i_3$$

$$i_5 > i_3$$

2 - On demande de comparer la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :

prévisions : Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible :

$$U_{BC} < U_{AF}$$

$$U_{BC} = U_{AF}$$

$$U_{BC} > U_{AF}$$

$$U_{BC} < U_{DE}$$

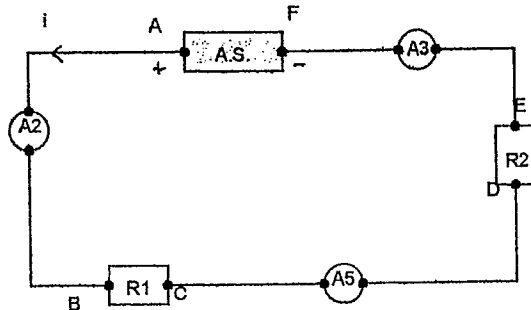
$$U_{BC} = U_{DE}$$

$$U_{BC} > U_{DE}$$

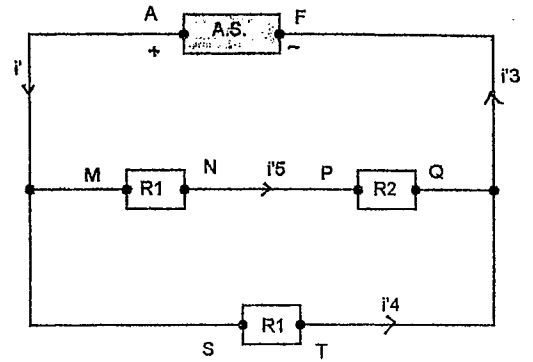
Question IV

Au montage en série de la question III, on ajoute un nouveau dipôle de résistance R_1 en dérivation. Les ampèremètres mesurent des intensités notées i' . On compare ces intensités.

Rappel du montage de la question III



Montage de la question IV



Un élève écrit les relations suivantes. Corrige la copie si nécessaire, et dans tous les cas explique la réponse que tu penses exacte.

$$i = i'$$

$$i'_5 < i_5$$

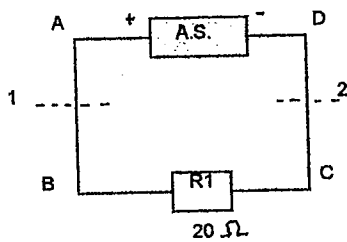
$$i'_3 = i_3$$

$$U_{MN} < U_{ST}$$

$$U_{ST} = U_{AF}$$

Question V

1 - Observer le circuit :



Un ampèremètre placé en 1 indique : $I_1 = 0,6 \text{ A}$
 Un ampèremètre placé en 2 indiquerait : $I_2 = \dots \text{ A}$

Compléter les valeurs des d.d.p. entre les points :

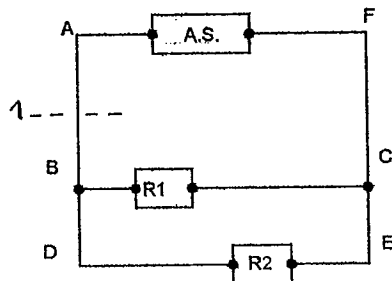
$$U_{AB} = \dots \text{ V}$$

$$U_{BC} = \dots \text{ V}$$

$$U_{CD} = \dots \text{ V}$$

$$U_{AD} = \dots \text{ V}$$

2 - Un deuxième dipôle de résistance $R_2 = 60 \Omega$ est placé en dérivation aux bornes de BC. Etablir les relations pour trouver la valeur de la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :



$$U_{AF} = \dots \text{ V} \quad \text{car}$$

$$U_{DE} = \dots \text{ V} \quad \text{car}$$

$$U_{BC} = \dots \text{ V} \quad \text{car :}$$

Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner les valeurs des intensités traversant tous les dipôles :

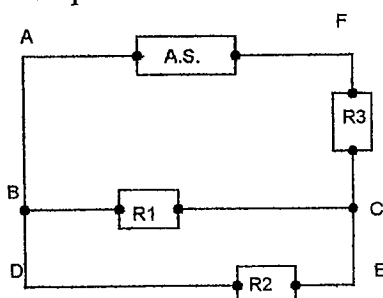
$$i_1 = \dots \text{ mA}$$

$$i_{BC} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{DE} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{CF} = \dots \text{ mA}$$

3 - Un troisième dipôle de résistance $R_3 = 15 \Omega$ est placé en série avec l'alimentation. Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :



$$U_{BC} = \dots \text{ V}$$

$$U_{DE} = \dots \text{ V}$$

$$U_{CF} = \dots \text{ V}$$

$$U_{AF} = \dots \text{ V}$$

$$U_{AB} = \dots \text{ V}$$

et les intensités traversant tous les dipôles :

$$i_{AB} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{BC} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{DE} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{CF} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{AF} = \dots \text{ mA}$$

QUESTIONNAIRE : Evaluation d'électricité en fin de 2^o.

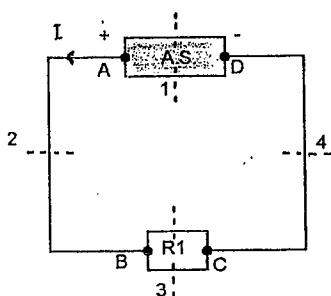
Dans toutes les questions, le **générateur** est une alimentation stabilisée : la **d.d.p.** à ses bornes est considérée **constante**. Le générateur est symbolisé par :



Pour répondre entoure les réponses qui te paraissent exactes, et surtout **explique ton choix**.
Nous utiliserons le symbolisme : plus grand que > identique à = plus petit que <

Question I

Soit le circuit constitué d'une alimentation stabilisée A.S. et d'un dipôle récepteur de résistance R1 :



On demande de comparer :

1 - l'intensité du courant traversant :

- le générateur I_1
- le conducteur AB I_2
- le récepteur BC I_3
- le conducteur CD I_4

2 - la d.d.p. aux bornes des deux dipôles.

Pour répondre, entourer les réponses exactes :

$I_1 < I_2$	$I_2 < I_3$	$I_3 < I_4$	$I_2 < I_4$	$U_{AD} < U_{BC}$
$I_1 = I_2$	$I_2 = I_3$	$I_3 = I_4$	$I_2 = I_4$	$U_{AD} = U_{BC}$
$I_1 > I_2$	$I_2 > I_3$	$I_3 > I_4$	$I_2 > I_4$	$U_{AD} > U_{BC}$

Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible (si tu ne sais pas répondre, explique ce qui te gêne)

1 - intensité :

I_1 I_2 car :

I_2 I_3 car :

I_3 I_4 car :

I_2 I_4 car :

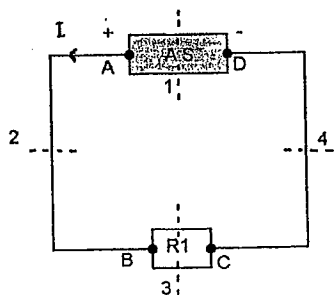
2 - d.d.p. :

U_{AD} U_{BC} car :

Question II

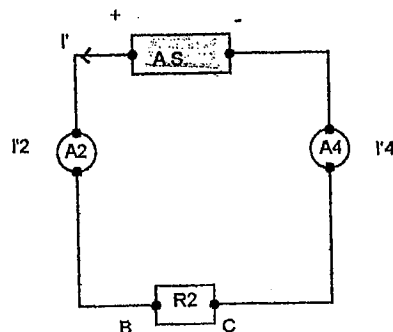
Le montage est celui de la question I, mais la valeur de la résistance du dipôle BC augmente pour prendre une valeur R_2 . Les intensités seront notées I' et les d.d.p. seront notées U' .

Rappel du montage de la question I



Montage de la question II

$R_2 > R_1$



1 - On demande de comparer les valeurs de l'intensité du courant notées I' à ce qu'elles étaient à la question I :

et explique tes choix le plus clairement possible :

$$I'_2 < I_2$$

$$I'_2 = I_2$$

$$I'_2 > I_2$$

et :

$$I'_4 < I_4$$

$$I'_4 = I_4$$

$$I'_4 > I_4$$

2 - On demande de comparer la d.d.p. aux bornes du dipôle BC :

explique ton choix, le plus clairement possible :

$$U'_{BC} < U_{BC}$$

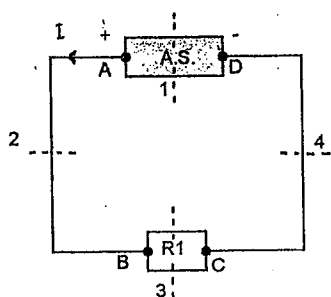
$$U'_{BC} = U_{BC}$$

$$U'_{BC} > U_{BC}$$

Question III

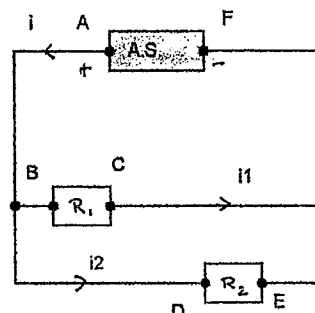
Les dipôles récepteurs utilisés dans les questions I et II sont maintenant montés en dérivation avec le même générateur. Les intensités du courant seront notées i .

Rappel du montage de la question I



Montage de la question III

$R_2 > R_1$



1 - On demande de comparer les nouvelles valeurs de l'intensité i du courant entre elles, et aux valeurs qu'elles avaient à la question I :

prévisions :

Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible :

$$i_1 < I_4$$

$$i_1 = I_4$$

$$i_1 > I_4$$

$$i < I_2$$

$$i = I_2$$

$$i > I_2$$

$$i_1 < i_2$$

$$i_1 = i_2$$

$$i_1 > i_2$$

2 - On demande de comparer la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :

prévisions :

Explique maintenant pourquoi le plus clairement possible :

$$U_{BC} < U_{AF}$$

$$U_{BC} = U_{AF}$$

$$U_{BC} > U_{AF}$$

$$U_{BC} < U_{DE}$$

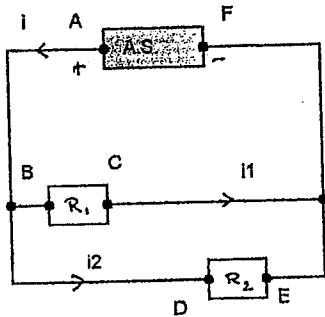
$$U_{BC} = U_{DE}$$

$$U_{BC} > U_{DE}$$

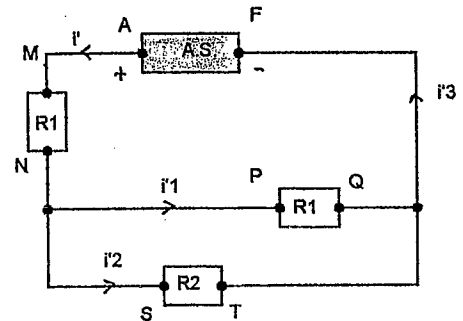
Question IV

Au montage en dérivation de la question III, on ajoute un nouveau dipôle de résistance R_1 . Les ampèremètres mesurent des intensités notées i' . On compare ces intensités.

Rappel du montage de la question III



Montage de la question IV



Un élève écrit les relations suivantes. Corrige la copie si nécessaire, et dans tous les cas explique la réponse que tu penses exacte.

$$i = i'$$

$$i'_1 < i_1$$

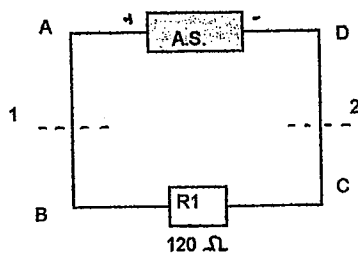
$$i'_3 = i'$$

$$U_{MN} < U_{PQ}$$

$$U_{ST} = U_{AF}$$

Question V

1 - Observer le circuit :



Un ampèremètre placé en 1 indique : $I_1 = 50 \text{ mA}$

Un ampèremètre placé en 2 indiquerait : $I_2 = \dots \text{ mA}$

Compléter les valeurs des d.d.p. entre les points :

$$U_{AB} = \dots \text{ V}$$

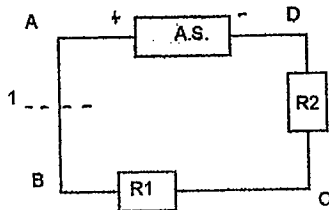
$$U_{BC} = \dots \text{ V}$$

$$U_{CD} = \dots \text{ V}$$

$$U_{AD} = \dots \text{ V}$$

2 - Un deuxième dipôle de résistance $R_2 = 80 \Omega$ est placé en série entre C et D.

Etablir les relations pour trouver la valeur de la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :



$$U_{AB} = \dots \text{ V} \quad \text{car}$$

$$U_{CD} = \dots \text{ V} \quad \text{car}$$

$$U_{BC} = \dots \text{ V} \quad \text{car :}$$

Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner les valeurs des intensités traversant tous les dipôles :

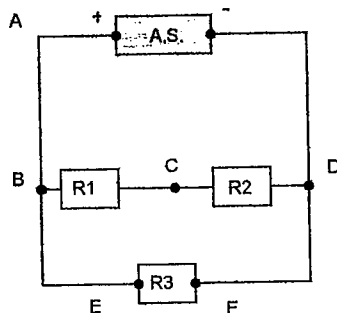
$$i_1 = \dots \text{ mA}$$

$$i_{BC} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{CD} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{AD} = \dots \text{ mA}$$

3 - Un troisième dipôle de résistance $R_3 = 100 \Omega$ est placé en dérivation aux bornes de l'ensemble. Etablir les relations algébriques, puis effectuer les calculs pour donner la d.d.p. aux bornes des différents dipôles :



$$U_{BC} = \dots \text{ V}$$

$$U_{CD} = \dots \text{ V}$$

$$U_{BD} = \dots \text{ V}$$

$$U_{EF} = \dots \text{ V}$$

$$U_{AD} = \dots \text{ V}$$

et les intensités traversant tous les dipôles :

$$i_{AB} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{BC} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{CD} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{EF} = \dots \text{ mA}$$

$$i_{AD} = \dots \text{ mA}$$

Questionnaire final
évaluation de la séquence d'électricité en classe de 2^o (Mai 2000)

Dans ce questionnaire, à chaque question, on fait évoluer un circuit, entre un état initial et un état final. Ce circuit comporte toujours le **même générateur** de force électromotrice **E** et de résistance interne négligeable, des **conducteurs ohmiques** de même résistance **R**. A chaque évolution du circuit, on cherche à prévoir ce qui sera éventuellement modifié au niveau de :

- 1- la **différence de potentiel**, ou d.d.p., (ou tension électrique) entre deux points du circuit
- 2- l'**intensité** qui circule entre ces points.

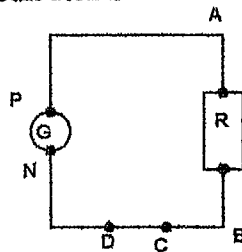
A chaque question tu as à compléter par :

augmente ou reste constante ou diminue

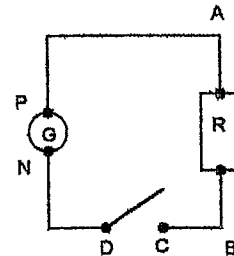
puis à justifier ta réponse le plus clairement possible.

Question I

Etat initial (1)
circuit fermé



Etat final (2)
circuit ouvert entre C et D



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments. Lors de l'ouverture du circuit entre C et D :

a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...

b - la d.d.p. aux bornes du fil PA ... car ...

c - la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique AB ... car ...

d - la d.d.p. aux bornes de l'interrupteur CD ... car ...

2 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit. Lors de l'ouverture du circuit entre C et D :

a - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...

b - l'intensité qui traverse le fil PA ... car ...

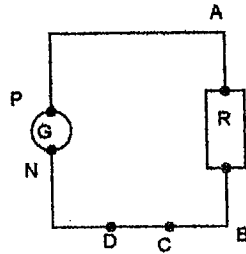
c - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...

d - l'intensité qui traverse le fil DN ... car ...

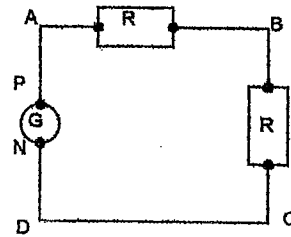
Question II

L'état initial est toujours le même : un circuit fermé comportant le générateur de force électromotrice E et le conducteur ohmique de résistance R . On modifie le circuit en ajoutant en série un deuxième conducteur ohmique identique au premier.

Etat initial (1)



Etat final (3)



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments. Après avoir ajouté le deuxième conducteur ohmique :

- a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...
- b - la d.d.p. aux bornes du fil PA ... car ...
- c - la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique AB ... car ...
- d - la d.d.p. aux bornes du conducteur BC ... car ...

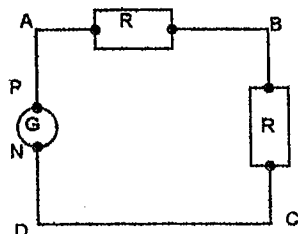
2 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit. Après avoir ajouté le deuxième conducteur ohmique :

- a - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...
- b - l'intensité qui traverse le fil PA ... car ...
- c - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...
- d - l'intensité qui traverse le fil DN ... car ...

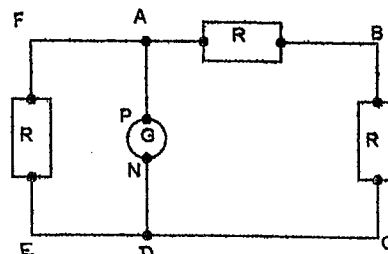
Question III

L'état initial est le circuit constitué du générateur de force électromotrice E en série avec deux conducteurs ohmiques de résistance R : état initial (3). On complète le montage en reliant un troisième conducteur ohmique de résistance R aux bornes du générateur : état final (4).

Etat initial (3)



Etat final (4)



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments.
Après avoir relié le troisième conducteur ohmique :

a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...

b - la d.d.p. aux bornes du dipôle AB car ...

2 - Dans l'état final (4), quelles relations peux-tu écrire entre les d.d.p. aux bornes des différents dipôles, soient U_{AB} ; U_{BC} ; U_{PN} et U_{FE} ? Pense à justifier chacune.

3 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit.
Après avoir relié le troisième conducteur ohmique :

a - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...

b - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...

4 - L'intensité parcourant la résistance R placée entre F et E est-elle la même que celle traversant la résistance R placée entre A et B

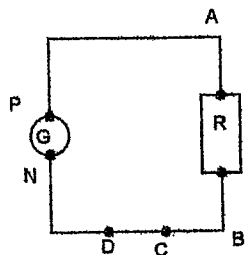
a - de l'état 1 b - de l'état 3 c - de l'état 4 d - ou encore différente

Encadre ta réponse et explique pourquoi :

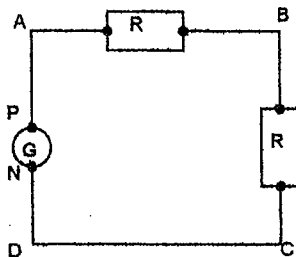
Question IV

rappel :

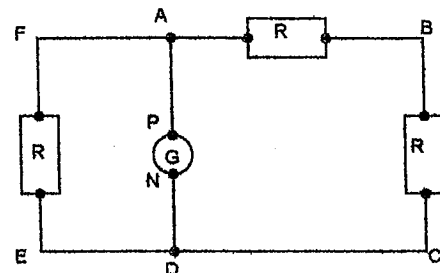
Etat 1



Etat 3



Etat 4



On demande maintenant de calculer les valeurs prises par la d.d.p. aux bornes des dipôles et par l'intensité qui les traverse, dans les différents circuits précédents, lorsque le générateur utilisé possède une force électromotrice $E = 6,6 \text{ V}$ et les conducteurs ohmiques une résistance $R = 33 \, \Omega$. Pour cela rédigez vos calculs sur une feuille, puis compléter le tableau ci-dessous :

	Etat 1	Etat 3	Etat 4
U_{PN}			
U_{CD}			
U_{AB}			
U_{BC}			
U_{FE}			
I_{PN}			
I_{AB}			
I_{BC}			
I_{FE}			

Questionnaire final évaluation de la séquence d'électricité en classe de 2^o

Dans ce questionnaire, à chaque question, on fait **évoluer un circuit**, entre un état initial et un état final. Ce circuit comporte toujours le **même générateur** de force électromotrice E et de résistance interne négligeable, des **conducteurs ohmiques** de même résistance R . A chaque évolution du circuit, on cherche à prévoir ce qui sera éventuellement modifié au niveau de :

- 1- la **différence de potentiel**, ou d.d.p., (ou tension électrique) entre deux points du circuit
- 2- l'**intensité** qui circule entre ces points.

A chaque question tu as à compléter par :

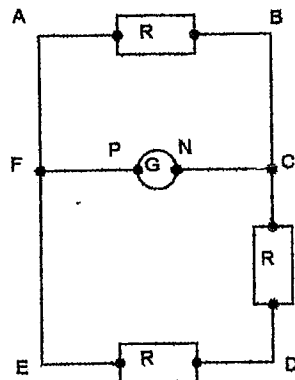
augmente ou reste constante ou diminue

puis à justifier ta réponse le plus clairement possible.

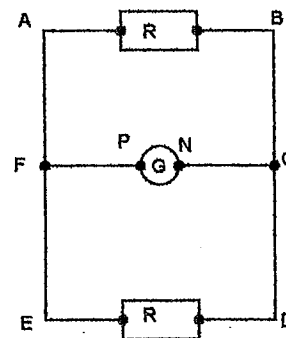
Question I

Soit le circuit initial (état initial 1) formé à partir du générateur de force électromotrice E et de trois conducteurs ohmiques identiques de résistance R . Puis on supprime le dipôle CD, tout en refermant le circuit à sa place (état final 2) :

Etat initial (1)



Etat final (2)



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments. Lors de la suppression du conducteur ohmique entre C et D :

a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...

b - la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique AB ... car ...

c - la d.d.p. entre C et D ... car ...

d - la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique DE ... car ...

2 - Dans l'état initial (1), quelles relations peux-tu écrire entre les d.d.p. aux bornes des différents dipôles, soient U_{AB} ; U_{PN} ; U_{ED} et U_{DC} ? Pense à justifier chacune.

3 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit. Lors de la suppression du dipôle entre C et D :

a - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...

b - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique DE ... car ...

c - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...

4 - L'intensité parcourant la résistance R placée entre A et B dans le circuit correspondant à l'état initial (1) est-elle la même que celle traversant la résistance R placée entre E et D

a - de l'état 1

b - de l'état 2

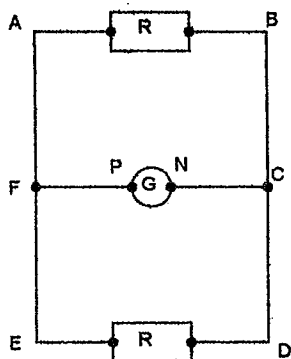
c - ou encore différente

Encadre ta réponse et explique pourquoi :

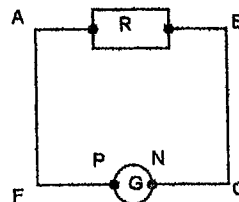
Question II

L'état initial (état 2) est constitué des deux conducteurs ohmiques précédents montés en dérivation aux bornes du générateur de force électromotrice E . On modifie le circuit en supprimant la branche ED : il reste un conducteur ohmique monté en série avec le générateur (état 3) :

Etat initial (2)



Etat final (3)



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments.
Après avoir supprimé le deuxième conducteur ohmique :

a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...

b - la d.d.p. aux bornes du conducteur ohmique AB ... car ...

2 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit.
Après avoir supprimé le deuxième conducteur ohmique :

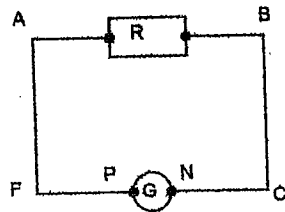
a - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...

b - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...

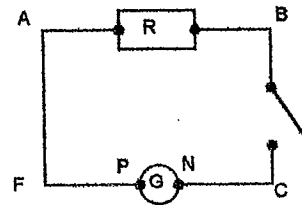
Question III

L'état initial est le circuit fermé constitué du générateur de force électromotrice E en série avec le conducteur ohmique AB de résistance R : état initial (3). On ouvre un interrupteur entre B et C . Ce circuit ouvert constitue l'état final (4).

Etat initial (3)



Etat final (4)



1 - On demande de comparer la différence de potentiel aux bornes des différents éléments. Lors de l'ouverture du circuit entre B et C :

a - la d.d.p. aux bornes du générateur PN ... car ...

b - la d.d.p. aux bornes du fil FA ... car ...

c - la d.d.p. aux bornes du dipôle AB ... car ...

d - la d.d.p. entre les points B et C ... car ...

3 - On s'intéresse maintenant à l'intensité qui traverse les différents éléments du circuit. Lors de l'ouverture du circuit entre B et C :

a - l'intensité qui traverse le générateur PN ... car ...

b - l'intensité qui traverse le fil FA ... car ...

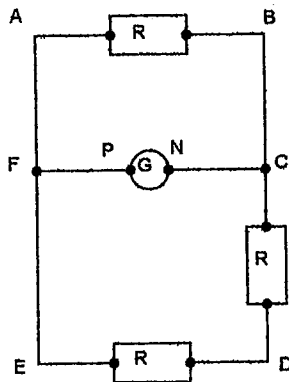
c - l'intensité qui traverse le conducteur ohmique AB ... car ...

d - l'intensité qui traverse le fil CN ... car ...

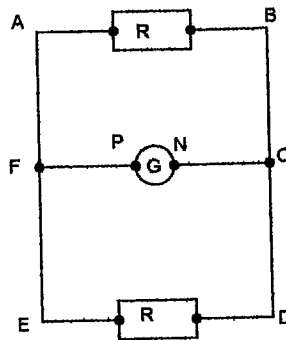
Question IV

rappel :

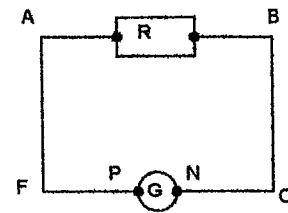
Etat 1



Etat 2



Etat 3



On demande maintenant de calculer les valeurs prises par la d.d.p. aux bornes des dipôles et par l'intensité qui les traverse, dans les différents circuits précédents, lorsque le générateur utilisé possède une force électromotrice $E = 6 \text{ V}$ et les conducteurs ohmiques une résistance $R = 100 \, \Omega$. Pour cela rédigez vos calculs sur une feuille, puis compléter le tableau ci-dessous :

	Etat 1	Etat 2	Etat 3
U_{PN}			
U_{AB}			
U_{CD}			
U_{ED}			
U_{BC}			
I_{PN}			
I_{AB}			
I_{CD}			
I_{DE}			

ANNEXE VII

Mémoire professionnel

Lionel JOURDES

JOURDES Lionel

MEMOIRE PROFESSIONNEL

***QUEL ENSEIGNEMENT EN ELECTRICITE POUR UNE
CLASSE DE SECONDE ?***

Comparaison des acquis en électrocinétique d'une population de seconde ayant suivi un enseignement utilisant des résultats de recherches en didactique et une population ayant suivi le programme officiel.

Année 1998-1999

**DIRECTEUR DE MEMOIRE :
Madame MISSIONIER**

PLAN DU MEMOIRE

INTRODUCTION (page 3)

I) PRESENTATION DE DEUX ENSEIGNEMENTS (page 4)

1) L'enseignement dit " classique "

2) L'enseignement dit " didactique "

II) PRESENTATION DU QUESTIONNAIRE (page 5)

1) Circuit et circulation

2) L'intensité

3) Que recherche chaque question ?

III) ANALYSE DES REPONSES RECUEILLIES AU QUESTIONNAIRE (page 9)

1) Circuit et circulation

2) La notion d'intensité

CONCLUSION (page 22)

INTRODUCTION

Dans la partie électricité des programmes la notion de circuit et de circulation n'est jamais abordée. Elle est probablement considérée comme évidente. Qu'en est-il pour l'élève après l'enseignement de seconde ?

Habituellement, l'enseignant aborde l'électricité au collège comme au lycée, en considérant ces notions comme intuitives et, sans vérifier les prérequis des élèves. Alors ne vaudrait-il pas mieux aborder l'électricité avec un enseignement tenant compte des recherches didactiques : faire exprimer aux élèves leurs représentations, utilisées comme hypothèses vérifiées expérimentalement, occasion d'un enseignement de ces notions, au lieu de passer directement aux lois de l'intensité, enseignement disons plus "conventionnel" ?

Pour tenter de répondre, nous allons poser un même questionnaire à une population d'élèves ayant reçu un enseignement conforme aux programmes et à une autre population d'élèves ayant reçu un enseignement de ces notions, avec une démarche de tests d'hypothèses. L'acquisition de ces notions est-elle équivalente chez les deux populations ? Et leurs performances sur le concept d'intensité sont-elles les mêmes ?

I) PRESENTATION DE DEUX ENSEIGNEMENTS

1) L'enseignement dit " classique "

Dans l'enseignement conforme au programme (dans lequel ne figure aucune indication concernant le circuit et la circulation) reçu par la population A, les notions de circuit et circulation n'ont jamais été enseignées. Par contre l'intensité est abordée : les élèves ont une première approche en faisant des mesures qui servent à faire découvrir les lois, lesquelles sont développées dans des exercices. Le concept est lié à un débit de charges qui se conserve.

Mais avec quel modèle du circuit l'élève aborde-t-il le concept d'intensité ?

2) L'enseignement dit " didactique "

En électricité, pour la population B, l'enseignement tenant compte des recherches didactiques utilise les démarches suivantes :

Dans un premier temps, le professeur vérifie que l'élève possède les prérequis nécessaires en lui faisant expliciter son modèle et son raisonnement sur la notion qu'il doit aborder. Pour cela, le professeur utilise un questionnaire (qui pose des situations énigmatiques pour faire exprimer le raisonnement naturel) auquel l'élève répond en faisant des prévisions. Ces différentes prévisions sont utilisées comme hypothèses au cours de l'expérience : elle les confirme ou les met en échec.

C'est dans un second temps que le professeur apporte un modèle qui permet d'interpréter les différentes expériences. Par la suite l'élève enrichira ce modèle en le faisant travailler dans des situations variées. C'est la phase de réinvestissement.

Ainsi à chaque fois qu'une nouvelle notion est enseignée, on demande à l'élève de s'investir dans son apprentissage. Cela devrait lui permettre de comprendre un phénomène et d'utiliser un raisonnement bien approprié au lieu de chercher à appliquer des lois et des formules qu'il utiliserait sans aucune compréhension.

Dans cet enseignement qui cherche à donner sens aux concepts, les notions de circuit,

circulation sont enseignées comme base nécessaire avant la construction du concept d'intensité, parce qu'il a semblé nécessaire de les faire acquérir aux élèves.

En conclusion de cette première partie nous pouvons constater que les deux populations ont reçu des enseignements suivant des démarches très différentes. Qu'en est-il de leurs acquis ?

II) PRESENTATION DU QUESTIONNAIRE

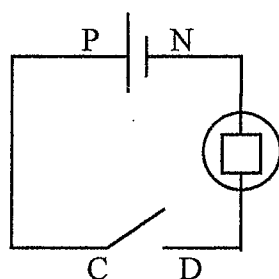
L'ensemble du questionnaire présenté aux élèves portera sur les deux notions suivantes : circuit (nécessité de fermeture pour qu'il y ait circulation) et intensité.

A travers les questionnaires posés en début d'année à mes élèves j'ai découvert les réponses suivantes concernant :

1) Circuit et circulation :

- A la question : Dans quelles portions du circuit existe-t-il un courant ?

- Schéma :



On peut obtenir les réponses suivantes :

- " Il existe un courant sur le tronçon P C car entre le point P et le point C il n'y a aucune interruption . "

- "Il existe un courant sur le tronçon P C car le courant part de la borne plus et en C il est bloqué ."

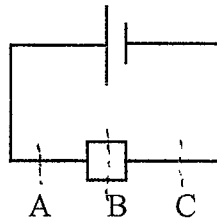
Exceptionnelles ? non, 58 % des élèves imaginent une circulation entre la pile et l'interrupteur ouvert, que les électrons « s'empilent » aux bornes de l'interrupteur .

Qu'en est-il à ce stade de l'année, Ce sera le but de la première partie du questionnaire.

2) Intensité :

- A la question : Comparer les valeurs des intensités entre les points A et B , B et C et entre les points A et C .

- Schéma :



On peut obtenir les réponses suivantes :

$$I_A = I_B, I_B > I_C, I_A > I_C \text{ car :}$$

- " la résistance retient l'intensité " ou,
- " la résistance réduit l'intensité ou,
- " la résistance stocke le courant " .

J'ai pu remarquer que 42 % des élèves imaginent une usure progressive du courant dans le circuit. Nous savons à partir des travaux de J.L. CLOSSET que ces représentations restent majoritaires au niveau universitaire après un enseignement traditionnel. Qu'en est-il chez nos deux populations ? C'est le but de la deuxième partie du questionnaire.

3) Que recherche chaque question ?

Question 1

On cherche à savoir si l'élève prévoit :

- une circulation en circuit fermé, soit entre les points A B C E F
- Une absence de circulation en circuit ouvert , soit entre les points C D G H E

(Ceci représente le raisonnement du physicien)

Question 2

On se pose la question : pour l'élève, une circulation correspond-elle à une conservation du débit de charges, ou les charges s'empilent-elles en un endroit du circuit ?

Question 3

Elle est composée de divers circuits fermés ou ouverts. On peut ainsi voir la cohérence avec la question 1 et la qualité d'analyse d'un circuit de la part de l'élève.

Question 4

On pose la question ouverte afin de ne rien suggérer et, l'élève donne sa façon de concevoir l'intensité qui peut être une force, une vitesse ou un débit d'électrons.

Question 5

Dans le cas du circuit 1, le physicien répondrait que L1 possède le même éclairement que L2 car les deux lampes sont branchées en série, donc traversées par le même débit.

Puis, au circuit 2, que L1 éclairera plus fortement que L2, que L2 et L3 posséderont le même éclairement car elles sont identiques et branchées en dérivation.

Par contre, on peut attendre de la part des élèves les raisonnements suivants :

Pour le circuit 1, que la lampe L1 brillera plus fortement que la lampe L2. Cela correspond au raisonnement séquentiel c'est à dire que le courant part à l'aventure dans le

circuit et que son débit (l'intensité) se modifie quand il parcourt le circuit de la borne positive à la borne négative.

Pour le circuit 2 on s'attend à avoir la loi des noeuds violée car la plupart des élèves en début d'année l'ignoraient ou ne savaient pas l'utiliser . Mais il peut y avoir aussi une mauvaise lecture du schéma par l'élève qui considère que L1 et L2 sont branchées en série.

Question 6

A la question 6a le physicien répond : $I_4 = I_2 + I_3$

A la question 6b le physicien répond :

$$I_4 > I_2 ; I_4 > I_3 ; I_2 = I_3 ; I_4 = I_5$$

L'élève qui raisonne séquentiellement répondra à la question 6 : $I_4 > I_5$.

L'élève qui viole la loi des noeuds répondra : $I_4 = I_3 = I_2$. Il est possible de lire ces réponses en relation avec celles du circuit 2 de la question 5.

Question 7

A la question 7a le physicien répond :

$$I'_1 > I'_2 ; I'_1 > I'_3 ; I'_2 < I'_3$$

A la question 7b le physicien répond :

$$I_4 > I'_1 ; I_2 > I'_2 ; I_3 < I'_3$$

Dans le cadre de cette question, il sera possible de trouver un raisonnement dit à courant constant qui pourra être limité à la pile (c'est à dire $I'_1 = I_4$, $I'_2 < I_2$, $I'_3 =$ ou $> I_3$), ou alors étendu à tout le circuit ($I'_1 = I_4$; $I'_2 = I_2$ et $I'_3 = I_3$) mais, ce raisonnement peut parfois amener l'élève à une prévision correcte dans les branches du circuit.

III) ANALYSE DES REPONSES RECUEILLIES AU QUESTIONNAIRE

Lors de cette analyse, nous allons vérifier quelle évolution ont apporté les deux enseignements, didactique (population B) et classique (population A) sur des élèves de seconde. C'est à dire, savoir si des élèves ont acquis le raisonnement du physicien et déterminer quel enseignement serait le plus approprié pour que le raisonnement de l'élève se rapproche le plus possible de celui du physicien.

1) Circuit et circulation :

Question 1 :

	Pourcentage des réponses à la question 1			
	Population B		Population A	
	Question 1 circuit fermé	Question 1 circuit ouvert	Question 1 circuit fermé	Question 1 circuit ouvert
<i>réponses correctes</i>	87,23	89,23	75	57,14
<i>réponses fausses</i>	9,23	10,77	25	45,86
<i>Pas de réponse</i>	3,08	0	0	0

Nous pouvons constater qu'entre 87 et 90 % des élèves, de la population B, savent qu'il y a une circulation du courant dans un circuit fermé et, pas de circulation dans un circuit ouvert. Ceci montre une évolution car au début de l'enseignement on avait 58 % des élèves qui pensaient le contraire dans le cas du circuit ouvert.

Par contre, les élèves de la population A semblent avoir bien acquis qu'il y a une circulation en circuit fermé mais, 57,14 % (ce que j'obtenais au début de l'année) pensent qu'il y a toujours une circulation en circuit ouvert, en amont de l'interrupteur ouvert .

Par conséquent il semblerait nécessaire de faire acquérir cette notion aux élèves car, l'enseignement en accord avec les programmes, ne permet pratiquement pas d'évolution de leurs représentations dans ce domaine.

Question 2 :

	Pourcentage des réponses à la question 2	
	Population B	Population A
	<i>Question 2</i>	<i>Question 2</i>
<i>réponses correctes</i>	41,54	3,57
<i>réponses fausses</i>	49,23	82,14
<i>Pas de réponse</i>	9,23	14,29

Dans cette question nous voulions savoir si l'élève avait acquis la conservation de la charge dans un circuit simple. Par le pourcentage des réponses correctes, 41,54 % pour la population B contre 3,57 % pour la population A, il semble clair que la notion n'est pas du tout acquise pour les élèves de la population A alors que c'est une compétence exigible du programme de seconde.

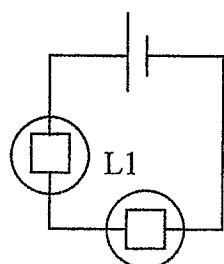
Cette différence provient sans doute du fait que l'enseignement didactique étudie, dans un premier temps, le phénomène de circulation du courant puis, explique le débit du courant dans un circuit avant de développer la loi des noeuds qui en est la conséquence.

Seulement, nous pouvons constater que 49,23 % des élèves de l'enseignement didactique n'ont pas encore acquis cette notion.

Question 3 :

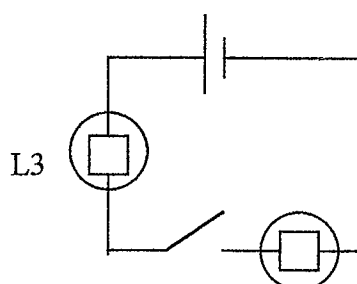
	Pourcentage des réponses à la question 3							
	Population B				Population A			
	<i>L1,L2 fermé</i>	<i>L5,L7 fermé</i>	<i>L3,L4 ouvert</i>	<i>L6 ouvert</i>	<i>L1,L2 fermé</i>	<i>L5,L7 fermé</i>	<i>L3,L4 ouvert</i>	<i>L6 ouvert</i>
<i>réponses correctes</i>	100,00	90,77	93,85	89,23	87,50	51,79	58,93	82,14
<i>réponses fausses</i>	0,00	3,08	4,62	4,62	12,50	46,43	41,07	16,07
<i>Pas de réponse</i>	0,00	6,15	1,54	6,15	0,00	1,79	0,00	1,79

Nous allons rappeler les circuits de la question 3 :



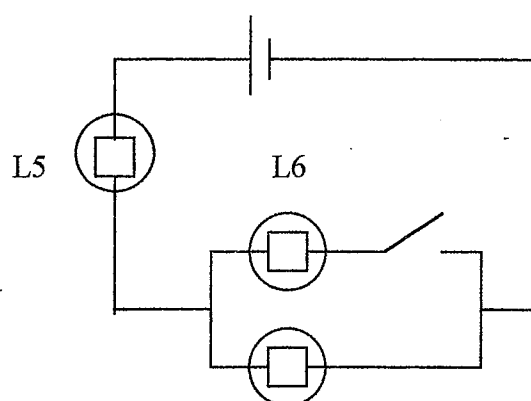
L2

circuit 1



L4

circuit 2



L7

circuit 3

Dans les réponses données par les élèves de la population B pour les circuits 1 et 2 (100 % pour le circuit 1 et 93,85 % pour le circuit 2), nous pouvons voir une cohérence avec la question 1 où les pourcentages sont inférieurs (87,69 % pour le circuit fermé et 89,23 % pour le circuit ouvert). Mais les circuits 1 et 2 sont plus simples; ce qui confirme que la notion de circuit et circulation est bien acquise pour les élèves dans le cadre du circuit simple.

Par contre les pourcentages de la question 1 se ressemblent avec ceux du circuit 3, qui

est un circuit mixte, ce qui montre la cohérence de leur raisonnement. Nous pouvons constater qu'entre les circuits 1 et 3, il y a une légère diminution des performances, c'est-à-dire que les élèves raisonnent mieux sur des circuits simples que sur des circuits plus compliqués. Donc les notions sont parfaitement acquises pour des circuits simples et correctement sur le circuit mixte.

On retrouve la même cohérence entre la question 1 et les circuits 1 et 2 pour les élèves qui ont suivi un enseignement classique. Mais les pourcentages calculés, pour le circuit 3, sont en totale incohérence avec la question 1 bien que les circuits se ressemblent. En effet les élèves répondent correctement, pour le circuit fermé, à 51,79 % (dans le circuit 3) et à 75 % (dans la question 1) . De même ils répondent correctement, pour le circuit ouvert, à 82,14 % (dans le circuit 3) et à 57,14 % (dans la question 1) . Par ces réponses il semble donc que les élèves n'ont pas réussi à faire la transposition entre la circulation du courant et l'intensité. Peut-être n'ont-ils aucune idée de ce qu'est en réalité l'intensité ?

De plus les élèves de l'enseignement classique obtiennent des pourcentages totalement différents entre le circuit 2 (58,93 % de réponses correctes) et la branche ouverte du circuit 3 (82,14 % de réponses correctes). Pour répondre à cette remarque, nous savons que la plupart des élèves raisonnent avec un générateur à débit constant. C'est à dire qu'ils pensent que la pile, lorsqu'elle est branchée (même sur une seule borne), débite toujours la même intensité. par contre ils ont acquis que lorsqu'un interrupteur est ouvert dans une branche du circuit, il n'y a pas de circulation d'un courant ; donc que la lampe ne s'allume pas.

Mais quand il n'y a qu'une seule branche, comme dans le cas du circuit 2, le raisonnement de l'élève se modifie. La pile débite un courant, ce qui explique que la lampe L3 s'allume, mais comme l'interrupteur est ouvert, il n'y a plus de courant qui circule après celui-ci. Donc la lampe L4 ne s'allume pas. Ce raisonnement fut expliqué dans ses travaux par J.L. CLOSSET.

Pour les élèves qui ont suivi l'enseignement didactique, on ne retrouve quasiment pas ce raisonnement. Ils ont donc une conception correcte du circuit ouvert. C'est à dire que, quelque soit la branche, si elle possède un interrupteur ouvert , il ne circule pas de courant dans cette dernière.

2) La notion d'intensité

Question 4 :

Elle posait aux élèves la question suivante : “ Que représente pour vous l'intensité ? ”

On a obtenu les réponses suivantes :

L'intensité est - un passage du courant

- un débit de charges

- un mouvement d'électrons

- une force

- une vitesse

- la puissance du courant

- quelque chose qui se mesure avec un ampèremètre

Ces différentes réponses sont dans le tableau ci-dessous avec les pourcentages d'élèves qui ont donné la même réponse.

Pourcentage des réponses à la question 4								
	Passage du courant	Débit de charges	Mouvement d'électrons	Une force	Une vitesse	La puissance du courant	quelque chose se mesurant avec un ampèremètre	Pas de réponse
Population B	10,77	23,08	15,38	9,23	3,08	3,08	4,62	30,77
Population A	8,93	0,00	10,71	8,93	0,00	1,79	5,36	64,29

On peut remarquer que très peu d'élèves, 23,08 % (dans la population B) et 0 % (dans la population A), savent définir l'intensité. Par contre quelques élèves (26,09 % au total) savent que l'intensité est un concept qui se ramène à un déplacement d'électrons dans

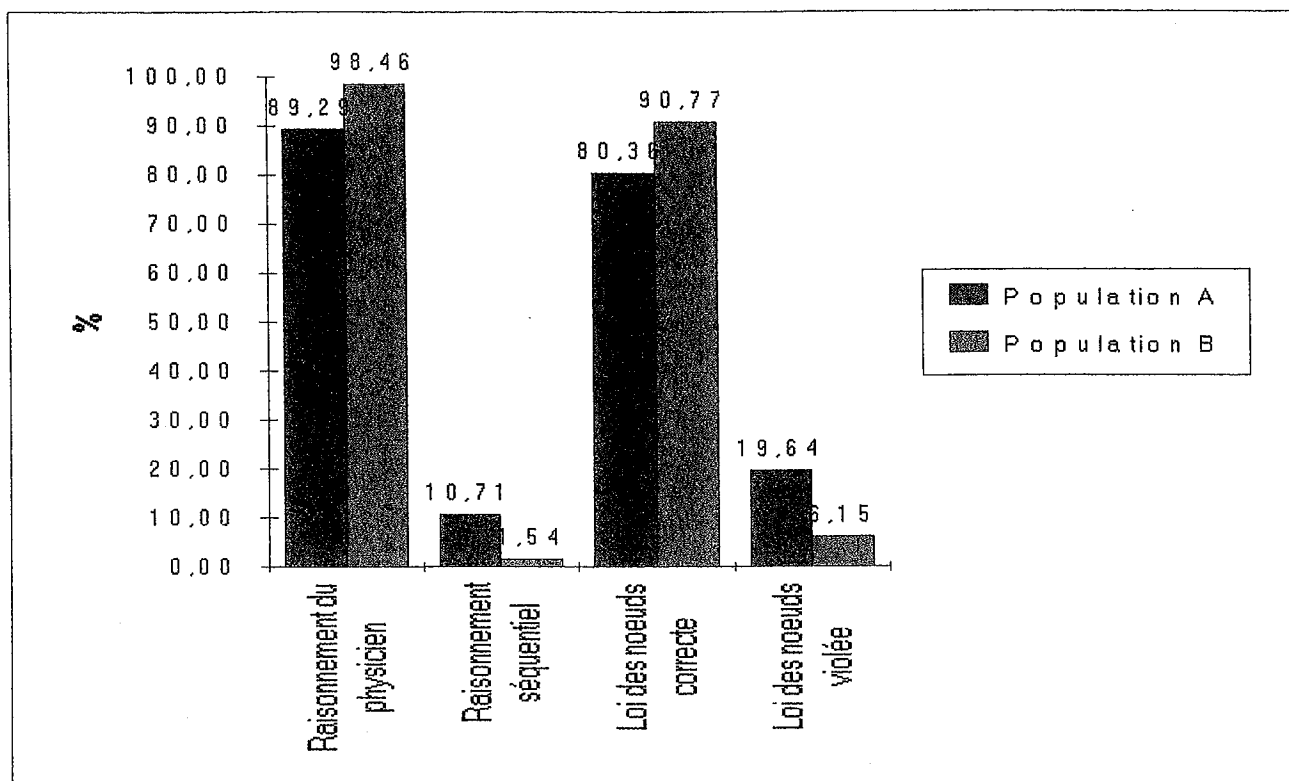
le circuit . Il est important de remarquer que 30,77 % des élèves de la population B et 64,29 % des élèves de la population A n'ont aucune idée de ce que représente l'intensité. Donc ils utilisent ce concept sans en avoir la moindre représentation.

Il est de même important de noter qu'entre 5 et 10 % des élèves donne une définition mécanique (une force) ou énergétique (une puissance) de l'intensité. De plus certains élèves ne savent pas la définition de l'intensité mais ils savent qu'on utilise un ampèremètre pour la mesurer.

Avec tous ces constats, ne vaudrait-il pas mieux essayer d'approfondir le concept de l'intensité, afin que les élèves puissent s'en faire une représentation la plus correcte possible ? Tout d'abord en donnant, dans un premier temps, la définition de la circulation (mouvement ordonné d'électrons), puis, dans un second temps, le concept de l'intensité en l'expliquant pour en donner, ensuite, la définition. Cette démarche ne semblerait-elle pas plus cohérente au lieu de faire mesurer aux élèves l'intensité, de leurs donner une simple formule expliquant que l'intensité est en fait un débit de charges (d'électrons) ?

Question 5 :

Pourcentage des réponses à la question 5								
	Population B				Population A			
	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds correcte</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds correcte</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>
<i>réponse</i>	98,46	1,54	90,77	6,15	89,29	10,71	80,36	19,64
<i>pas de réponse</i>	4,62	4,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Pour répondre à la question, l'élève devait raisonner sur l'éclairement de diverses lampes branchées en série (dans le circuit 1) et sur un circuit mixte (circuit 2). Des diverses réponses données, on a pu déduire le pourcentage d'élèves qui développent un raisonnement proche du physicien, ou au contraire un raisonnement séquentiel, et le pourcentage d'élèves qui violaient ou non la loi des noeuds.

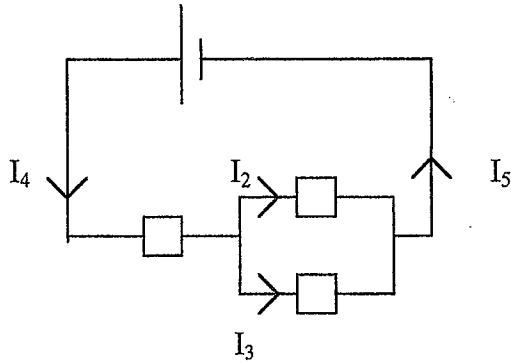
Nous savons qu'au départ de l'enseignement de physique au lycée, la plupart des élèves utilisent le raisonnement séquentiel. Sur de simples circuits série, le graphique indique que les deux enseignements semblent identiques car les résultats sont proches à 10 % près.

En effet 98,46 % des élèves de la population B contre 89,29 % des élèves de la population A utilisent le raisonnement du physicien et 90,77 % de la population B contre 80,36 % de la population A utilisent correctement la loi des noeuds.

Par conséquent, il semblerait que pour de simples exercices les deux enseignements sont équivalents avec une légère supériorité pour celui de didactique. Mais qu'en est-il si l'on utilise la loi des noeuds pour raisonner ?

Question 6 :

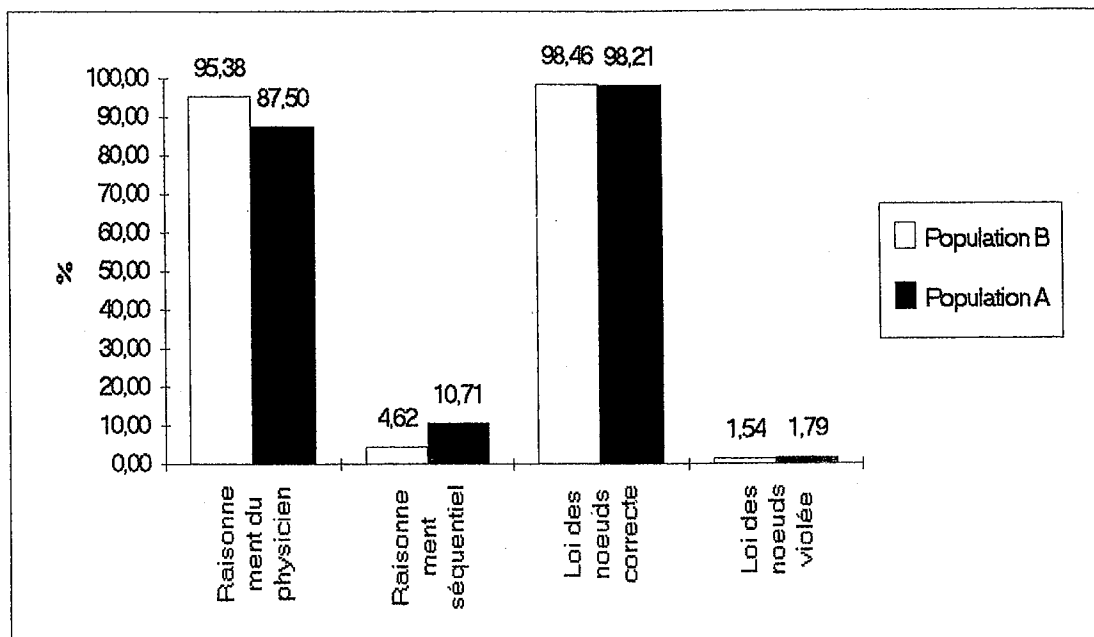
Dans le questionnaire qui fut distribué, les élèves avaient le circuit suivant :



Dans tous les questionnaires les élèves ont su écrire la loi des noeuds, c'est à dire $I_4 = I_2 + I_3 = I_5$.

Ensuite, les élèves devaient comparer les intensités qui parcouraient les diverses branches du circuit.

Pourcentage des réponses à la question 6								
	Population B				Population A			
	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds correcte</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds correcte</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>
<i>réponse correcte</i>	95,38	4,62	98,46	1,54	87,50	10,71	98,21	1,79
<i>pas de réponse</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Nous pouvons constater que très peu d'élèves utilisent le raisonnement séquentiel et que la loi des noeuds est faiblement violée. En effet 95,38 % des élèves de la population B et 87,50 % des élèves de la population A utilisent le raisonnement du physicien pour résoudre et comparer les intensités. Par conséquent, sur des circuits simples, une majorité d'élèves des deux enseignements ont acquis:

- le raisonnement du physicien et, l'utilisent pour comparer les éclairements de diverses lampes
- la loi des noeuds.

Mais est-ce toujours le cas si on modifie ou si on complique le circuit ? c'est le but de la question 7.

Question 7 :

Dans la question 7, on avait rajouté une résistance dans l'une des branches. Les élèves devaient, dans un premier temps, comparer les valeurs des intensités du courant dans chaque branche, puis, comparer les valeurs de ces nouvelles intensités avec celles de la question 6 .

Cette question permettra de mettre en évidence :

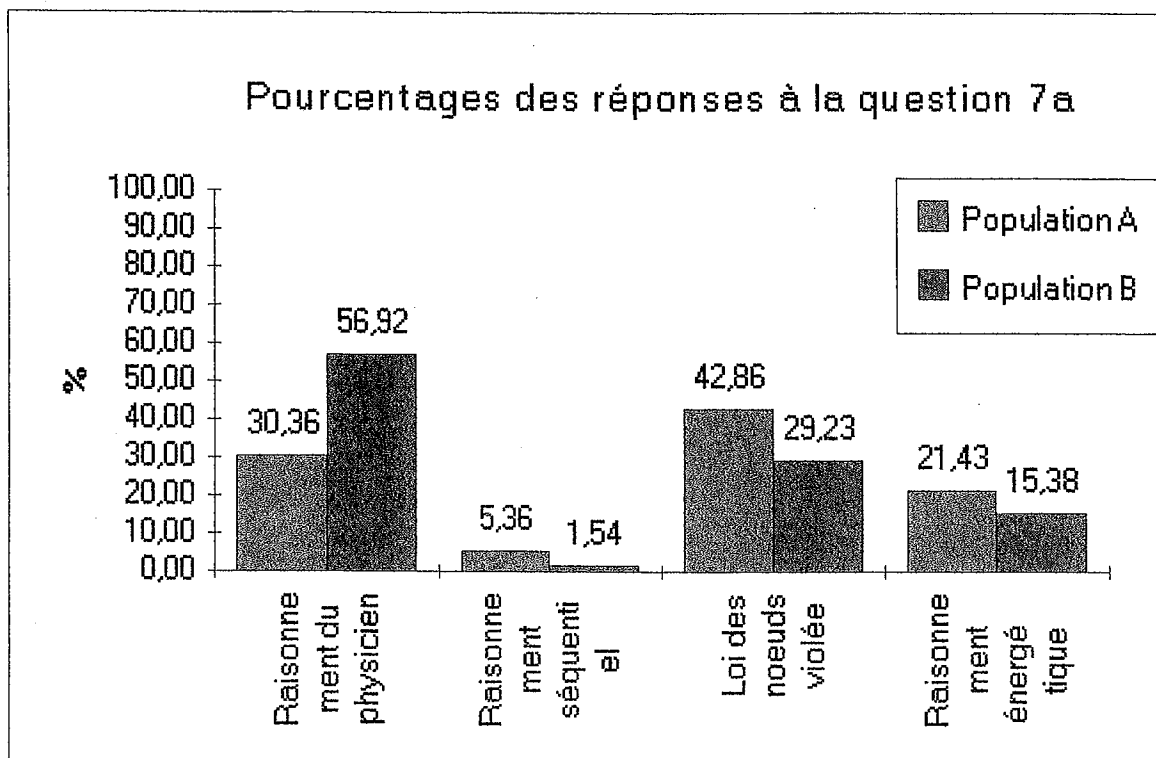
- Quel raisonnement prédomine chez les élèves des deux enseignements ?

- Y a-t-il évolution du raisonnement séquentiel vers un raisonnement qui se rapprocherait de celui du physicien ?

- Le raisonnement à courant constant c'est à dire que le générateur délivre la même valeur de l'intensité quelque soit le circuit. Ce raisonnement permet souvent à l'élève de répondre correctement lorsqu'il travaille sur les états stationnaires : ce raisonnement n'apparaît que lorsque le circuit est modifié.

Pourcentage des réponses à la question 7										
	Enseignement didactique					Enseignement classique				
	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>	<i>Raisonnement énergétique</i>	<i>Raisonnement à courant constant</i>	<i>Raisonnement du physicien</i>	<i>Raisonnement séquentiel</i>	<i>Loi des noeuds violée</i>	<i>Raisonnement énergétique</i>	<i>Raisonnement à courant constant</i>
<i>Réponse à la question 7a</i>	56,92	1,54	29,23	15,38		30,36	5,36	42,86	21,43	
<i>Réponse à la question 7b</i>	15,38			6,15	76,92	3,57			7,14	85,71

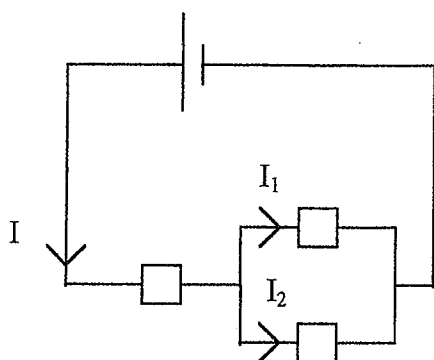
Remarque: les parties ombrées du tableau indiquent que les thèmes n'ont pas été recherchés dans les questions .



Nous pouvons remarquer que parmi la population A, 30,36 % des élèves utilisent le raisonnement du physicien et que 42,86 % violent la loi des noeuds.

On peut voir apparaître un nouveau raisonnement, le raisonnement énergétique. Ce raisonnement indique que l'élève considère les dipôles passifs d'un point de vue énergétique. En fin de compte il y a augmentation de la valeur de l'intensité dans une branche si on rajoute un dipôle (" une résistance plus grosse a besoin de plus d'énergie ").

En conséquence des élèves qui ont reçu un enseignement dit " classique ", sur un schéma évolutif sont plus nombreux à violer la loi des noeuds ou utiliser le raisonnement énergétique afin de se retrouver dans le cas classique d'un circuit mixte qui aurait le schéma suivant :



page 19

Quelles pourraient être les raisons de cette attitude ?

Il peut y avoir deux raisons possibles.

La première serait que l'élève a déjà vu ce type de circuit en troisième. Au cours de cette période le professeur s'est tenu à lui faire appliquer la loi des noeuds ($I = I_1 + I_2$) avec deux dipôles identiques dans les branches. Ceci implique et fut démontré, dans la plupart des cas, que I_1 est égale à I_2 . L'élève en a conclu, en fin de troisième, que dans tous les cas I_1 était toujours égale à I_2 . Cette notion ne lui a pas été ni infirmée et ni vérifiée par l'expérience au cours de l'enseignement d'électricité en seconde, dans la plupart des cas.

La deuxième possibilité serait que l'élève ne sait pas raisonner avec la loi des noeuds. C'est à dire qu'il sait l'utiliser pour les calculs mais ne sait pas prévoir avec cette dernière lorsqu'un paramètre change dans le circuit.

Dans le cadre de la population B, on peut voir que plus de 50 % des élèves utilisent le raisonnement du physicien. Par contre, il n'y a que 19,23 % des élèves qui violent la loi des noeuds (le double dans l'enseignement classique) et 15,38 % utilisent le raisonnement énergétique. Donc, environ 35 % des élèves n'utilisent pas le raisonnement du physicien. Cela peut être du à la première possibilité qui fut indiquée dans l'enseignement classique ou bien qu'une partie des élèves raisonnent à courant constant ce qui implique qu'ils soient obligés de violer la loi des noeuds pour que la valeur de l'intensité délivrée par le générateur soit la même.

Pour la deuxième partie de la question 7 il est facile de voir que le raisonnement à courant constant n'est pas éliminé dans les deux enseignements. En effet, 76,92 % des élèves de la population B et 85,71 % des élèves de la population A utilisent le raisonnement à courant constant. Nous pouvons remarquer qu'il y a cinq fois plus d'élèves de l'enseignement didactique qui utilisent le raisonnement du physicien. Ceci pourrait vouloir dire que l'enseignement didactique amènerait davantage l'élève à utiliser le raisonnement du physicien.

Dans le cas du raisonnement à courant constant, il est très difficile de le faire

disparaître (c'est un réel obstacle) avant d'arriver au raisonnement du physicien. Mais il faut amener l'élève à utiliser le raisonnement du physicien dans tous types de circuits.

Mais on a pu constater, avec les résultats de la question 7 a, que l'enseignement dit " classique " ne permet pas à 50 % des élèves d'acquérir un raisonnement proche de celui du physicien, lorsqu'ils utilisent un circuit mixte qui évolue.

Par conséquent l'enseignement classique semble dépendant des automatismes sur des systèmes stationnaires où l'élève utilise les lois. Au contraire, l'enseignement didactique en habituant l'élève à des schémas évolutifs, l'habitue à raisonner sur des situations variées.

CONCLUSION

Nous nous sommes donné les moyens de comparer deux enseignements, totalement différents, dans le but de donner à des élèves de seconde la possibilité de perfectionner leurs constructions de connaissances en électricité.

Dans un circuit ouvert, nous avons mis en évidence que 45 % de la population A imagine la circulation d'un courant. Ceci signifie que les élèves de la population A n'ont pas acquis la notion de circulation du courant. Pourtant cette notion est essentielle pour comprendre le fonctionnement d'un circuit électrique. Par contre pour les élèves de la population B, qui ont étudié le modèle circulatoire du courant, ce n'est pas le cas. Donc, ne faudrait-il pas mieux introduire l'électricité par la notion de circulation avant d'introduire la notion d'intensité ?

Ensuite, sur l'ensemble de l'analyse, nous pouvons étudier l'évolution de la loi des noeuds et la comparer sur les deux enseignements.

Pour les élèves de la population A, il semblerait que lorsque le circuit se complique ils auraient tendance à violer davantage la loi des noeuds. De plus, les études qualitatives des circuits ne semblent pas acquises, et ils calculent mieux qu'ils ne raisonnent.

Pour les élèves de la population B, nous pouvons voir que très peu d'élèves modifient leur raisonnement, c'est-à-dire violent la loi des noeuds. Par conséquent nous pouvons en déduire que la loi des noeuds est un concept qui semble mieux maîtrisé par les élèves de la population B que par ceux de la population A.

Sur l'ensemble de toute l'analyse, nous pouvons constater que l'enseignement classique, bien qu'il permette de donner aux élèves un raisonnement sur des circuits simples, n'a quasiment aucune efficacité lorsque le circuit mixte évolue. Peut-être que les élèves de cet enseignement savent utiliser les lois de l'électricité dans le calcul, mais n'est-il pas plus important qu'ils sachent raisonner sur un circuit, afin de prévoir ce qui pourrait se passer si on change un paramètre ? N'est-ce pas ce que l'on fait continuellement dans la vie courante ?

Il semblerait que l'enseignement didactique, par un travail beaucoup plus qualitatif, sur des circuits évolutifs, entraîne l'élève à réfléchir et à mieux se représenter le fonctionnement d'un circuit.

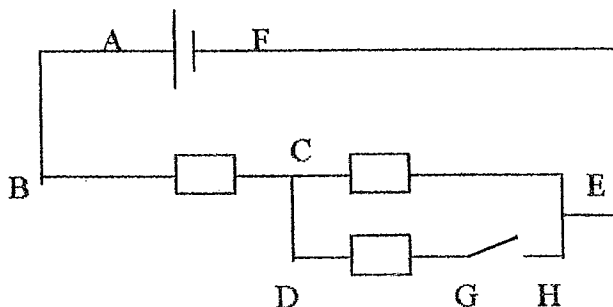
L'inconvénient de l'enseignement didactique est qu'il est long mais ne vaut-il pas mieux que l'élève de seconde possède des bases correctes en électricité, qu'il retrouvera tout au long de son cursus scolaire (première, terminale ...) et même dans la vie courante ?

Enfin, il semblerait que le programme de troisième, en électricité, incite l'élève à se fabriquer des lois erronées, ce qui compliquerait l'enseignement de l'électricité en seconde.

ANNEXES

QUESTIONNAIRE

Question 1



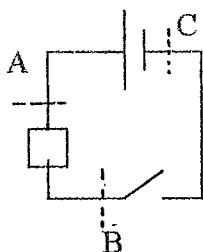
Dans quelles portions du circuit existe-t-il un courant ?

Entourer les réponses exactes .

AB	oui	non	je ne sais pas	DG	oui	non	je ne sais pas
BC	oui	non	je ne sais pas	HE	oui	non	je ne sais pas
CE	oui	non	je ne sais pas	EF	oui	non	je ne sais pas

Question 2

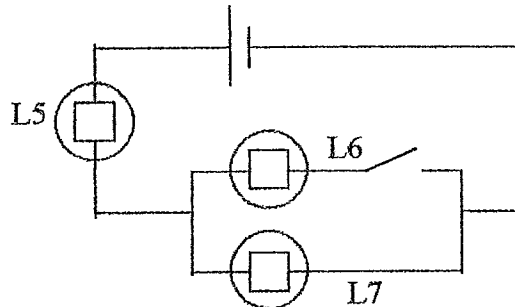
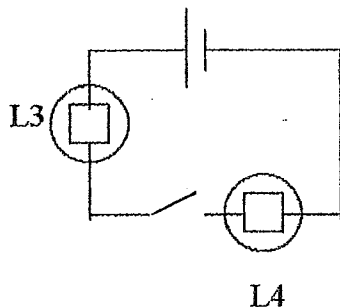
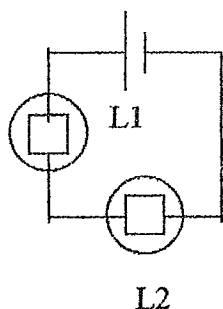
Dans le circuit suivant a-t-on une accumulation de charges aux points suivants:



Point A	oui	non	je ne sais pas
Point B	oui	non	je ne sais pas
Point C	oui	non	je ne sais pas

Question 3

Dans les circuits suivants indiquez quelles sont les lampes qui s'allument en les entourant ?



Question 4

Que représente pour vous l'intensité ?

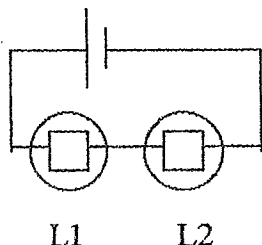
Question 5

Dans les circuits suivants , les lampes sont identiques . On va comparer les éclairagements des lampes .

Entourer les réponses exactes .

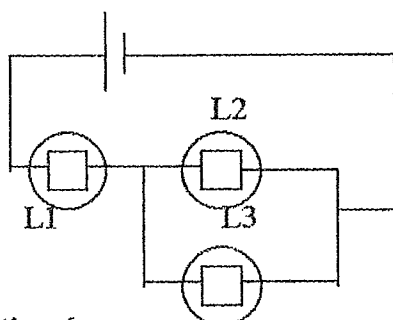
Légende : < éclairer plus faiblement que
> éclairer plus fortement que
= éclairer de la même façon que

Circuit 1:



- $L1 > L2$
- $L1 < L2$
- $L1 = L2$
- Je ne sais pas

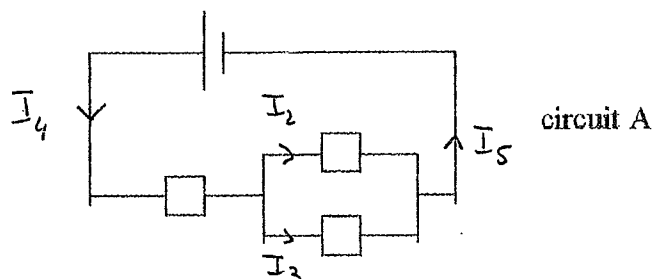
Circuit 2 :



- | | |
|----------------|----------------|
| $L1 > L2$ | $L1 > L3$ |
| $L1 < L2$ | $L1 < L3$ |
| $L1 = L2$ | $L1 = L3$ |
| Je ne sais pas | je ne sais pas |
-
- | |
|----------------|
| $L2 > L3$ |
| $L2 < L3$ |
| $L2 = L3$ |
| Je ne sais pas |

Question 6

Dans le circuit suivant les résistances sont de valeur identique .



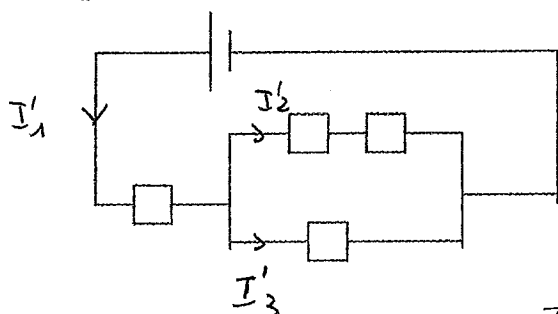
a) Donner la loi des noeuds pour le circuit ci-dessus .

b) On va comparer les intensités des courants qui circulent . Entourer la bonne réponse :

- | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| $I4 > I2$ | $I4 > I3$ | $I4 > I5$ | $I2 > I3$ |
| $I4 < I2$ | $I4 < I3$ | $I4 < I5$ | $I2 < I3$ |
| $I4 = I2$ | $I4 = I3$ | $I4 = I5$ | $I2 = I3$ |
| Je ne sais pas | Je ne sais pas | Je ne sais pas | Je ne sais pas |

Question 7

Dans le circuit les résistances sont de valeurs identiques . On va comparer les intensités des courants qui circulent . Entourer les réponses exactes :



- a)
- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| $I'1 > I'2$ | $I'1 > I'3$ | $I'2 > I'3$ |
| $I'1 < I'2$ | $I'1 < I'3$ | $I'2 < I'3$ |
| $I'1 = I'2$ | $I'1 = I'3$ | $I'2 = I'3$ |
| Je ne sais pas | Je ne sais pas | Je ne sais pas |

b) On va comparer les intensités I' avec les intensités I du circuit A :

- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| $I4 > I'1$ | $I2 > I'2$ | $I3 > I'3$ |
| $I4 < I'1$ | $I2 < I'2$ | $I3 < I'3$ |
| $I4 = I'1$ | $I2 = I'2$ | $I3 = I'3$ |
| Je ne sais pas | Je ne sais pas | Je ne sais pas |

ANNEXE VIII

Evaluation de la séquence par les élèves

Evaluation de la séquence par les élèves

1 / Dans la séquence présentée, quel était pour toi l'épisode

- a - le plus surprenant :
- b - le plus difficile :
- c - le plus décevant :
- d - le plus enrichissant :

2 / Ce type d'enseignement t'a-t-il permis de comprendre :

mieux / pareil / moins bien / qu'un cours classique, tels ceux que tu as vécu en 4°, 3°, ou de ton livre (entoure ta réponse et précise pourquoi) :

3 / Qu'est-ce qui t'a le mieux aidé à comprendre (expliquer et prévoir) des aspects nouveaux du fonctionnement d'un circuit : (les classer du plus utile pour toi n°1 , un peu moins n°2....)

- les relations mathématiques
 - les analogies
 - les expériences
 - autres :
- explique précisément pourquoi :

4 / a - Reste-t-il des points d'ombre dans le fonctionnement du circuit électrique que tu souhaiterais pouvoir travailler ? Précise lesquels :

b - Qu'est-ce que tu voudrais encore savoir ?

c - Quels sont les moyens que tu aimerais avoir à ta disposition pour cela :

- expériences
- logiciels de simulation
- exercices
- autres : précise lesquels :

**Document utilisé lors de la première séance
de l'option sciences expérimentales**

1° S

publié dans le B.U.P. n° 769 pp. 1847-1857

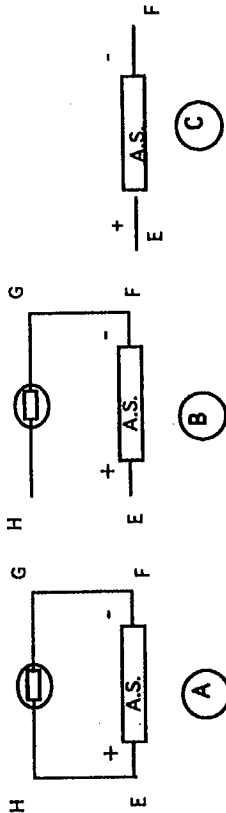
par la MAFPEN de Rennes

Après avoir lu les différentes questions :

- donnez votre réponse en plaçant une croix dans la case correspondant à la bonne affirmation,
- faites la vérification expérimentale,
- notez le résultat obtenu,
- ne corrigez jamais votre réponse initiale même s'il y a contradiction avec la mesure,
- notez le temps passé à chaque activité.

1. NOTION DE TENSION ET D'INTENSITÉ

Considérez les trois figures A, B, C.



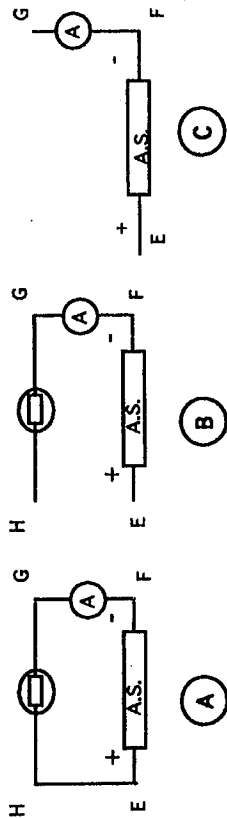
Matériel disponible

- alimentation stabilisée réglée,
- ampèremètre numérique,
- voltmètre numérique,
- fils,
- deux ampoules,
- résistances 10 Ω et 56 Ω ,
- interrupteur.

	A	B	C
a - L' alimentation stabilisée délivre un courant			
b - Il existe une tension entre E et F			
c - Il existe une tension entre G et H			

Vérification expérimentale

- Affirmation a : Introduisez l'ampèremètre dans le montage comme l'indiquent les schémas et notez les valeurs de l'intensité.



I =

I =

I =

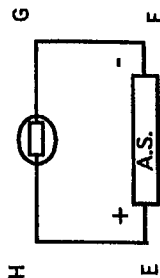
	A	B	C
- Affirmation b : mesurez la tension entre E et F	U =	U =	U =
- Affirmation c : mesurez la tension entre G et H	U =	U =	U =

durée :

Quelles difficultés avez-vous rencontrées ?

2. L'INTENSITÉ DU COURANT DANS UN CIRCUIT

2.1. L'ampoule est branchée aux bornes de l'alimentation stabilisée



L'intensité est-elle la même de part et d'autre de l'ampoule ?

oui ☐ non ☐

Vérification expérimentale

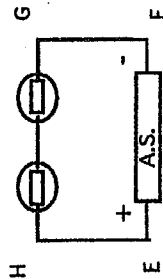
Faire le schéma du montage.

$I_{EH} =$

$I_{GF} =$

durée :

2.2. Une ampoule de même type est ajoutée en série dans le circuit

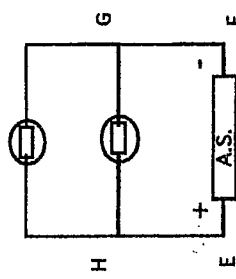


L'intensité dans la branche EH a-t-elle la même valeur que dans le circuit 2.1. ?

oui ☐ non ☐

Faites la vérification expérimentale : $I_{EH} =$

2.3. Les deux ampoules sont maintenant placées en parallèle (ou dérivation)



L'intensité dans la branche EH a-t-elle la même valeur que dans le circuit 2.1. ?

oui ☐ non ☐

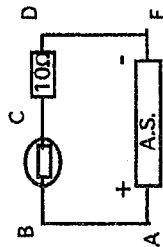
Faites la vérification expérimentale : $I_{EH} =$

durée :

3. TENSION ENTRE DEUX POINTS DANS UN CIRCUIT

A - CIRCUIT SÉRIE

a -



Les tensions entre B et C d'une part, notée U_1 , C et D d'autre part, notée U_2 ont-elles en général la même valeur ?

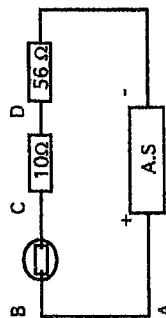
oui ☐ non ☐

Faites la vérification expérimentale.

Notez les valeurs : $U_1 =$

$U_2 =$

durée :

b - On introduit une résistance de $56\ \Omega$ 

La tension U_1 entre B et C est-elle la même qu'en a ?

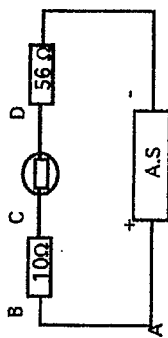
oui ☐ non ☐

Faites la vérification expérimentale.

Notez la valeur : $U_1 =$

durée :

c - On permute l'ampoule et la résistance de $10\ \Omega$



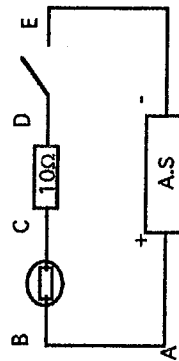
La tension aux bornes de l'ampoule a-t-elle changé ?

oui ☐ non ☐

Faites la vérification expérimentale.

d - On remplace la résistance de $56\ \Omega$ par un interrupteur

L'interrupteur est ouvert :



La tension U_1 entre B et C est-elle la même qu'en a ?

oui ☐ non ☐

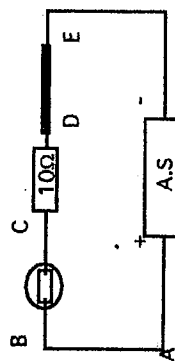
Faites la vérification expérimentale.

Notez la valeur : $U_1 =$

Mesurez la tension U_3 entre D et E : $U_3 =$

durée :

L'interrupteur est fermé :



La tension U_1 entre B et C est-elle la même qu'en a ?

oui ☐ non ☐

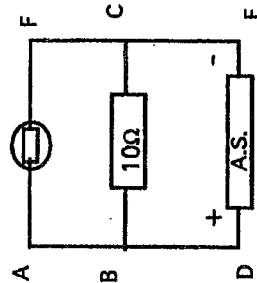
Faites la vérification expérimentale.

Notez la valeur : $U_1 =$

Mesurez la tension U_3 entre D et E : $U_3 =$

durée :

B - CIRCUIT PARALLÈLE



On note les tensions U'_1 entre A et F, U'_2 entre B et C, U'_3 entre D et E. Quelle est la bonne relation ?

$U'_1 = U'_2 = U'_3$ oui ☐ non ☐
ou $U'_1 \neq U'_2 \neq U'_3$ oui ☐ non ☐

Faites la vérification expérimentale.

$U'_1 =$ $U'_2 =$ $U'_3 =$

Que pensez-vous de cette fiche ? (Intérêt, difficulté, etc.).

Résumé

Le travail concerne une démarche d'ingénierie didactique relative à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde (grade 10), en France.

Des analyses préalables nous ont conduit à tester quatre hypothèses reposant sur la maîtrise des prérequis, une approche énergétique préalable du circuit électrique, une démarche qualitative et une introduction indépendante des concepts.

Leur mise en oeuvre d'abord dans la classe du chercheur, puis dans d'autres classes, enfin dans d'autres académies ont permis de découvrir :

- des aides à l'apprentissage comme la maîtrise des prérequis, ou l'approche qualitative, facilitées par des classes homogènes et des espaces de remédiation ;
- des chemins d'apprentissage du concept d'intensité ;
- des difficultés non résolues comme le passage au formalisme ;
- l'élaboration par ces élèves d'un savoir d'une nature différente.

Mots clés :

Analogie - Chemin d'apprentissage - Didactique - Electricité - Energie -
Enseignement - Ingénierie didactique - Prérequis - Qualitatif -
Remédiation - Séquence.